

العلوم الأساسية

أساسيات الجيولوجيا الفيزيائية

أ.د. محمد أحمد حسن هيكل د. عبد الجليل عبد الحميد هويدي

مكتبة الدار العربية للكتاب



أساسيات

الجيولوجيا الفيزيائية

مكتبة الدار العربية للكتاب

الهيئة الاستشارية

- أ. د. إبراهيم محمد يوسف غالى - أستاذ الرياضيات - كلية العلوم - جامعة الأزهر .
أ. د. باهر عبد الحميد القليوبى - أستاذ علم الجيولوجيا - كلية العلوم - جامعة عين شمس .
أ. د. حسن أحمد شحاتة - أستاذ الكيمياء الفيزيائية - كلية العلوم - جامعة الأزهر .
أ. د. حمزة أحمد السيد الشبكة - أستاذ علم الحيوان - كلية العلوم - جامعة عين شمس .
أ. د. رافت كامل واصف - أستاذ الفيزياء - كلية العلوم - جامعة القاهرة .
أ. د. سيد ثابت عبد الرحيم - أستاذ الكيمياء الفيزيائية - كلية العلوم - جامعة عين شمس .
أ. د. صبرى صادق أحمد الصيرفى - أستاذ علم الحيوان - عميد كلية العلوم - جامعة الزقازيق .
أ. د. عبد الجليل عبد الحميد على هويدى - أستاذ ورئيس قسم الجيولوجيا - كلية العلوم - جامعة الأزهر .
أ. د. عبد الرؤوف فريد الحفناوى - أستاذ الرياضيات - كلية العلوم - جامعة الزقازيق .
أ. د. عبد العال حسن مباشر - أستاذ علم النبات - كلية العلوم - جامعة أسيوط - نائب رئيس الجامعة سابقاً .
أ. د. محمد إبراهيم أحمد على - أستاذ علم النبات - كلية العلوم - جامعة القاهرة .
أ. د. منى صلاح الدين حسن طلعت - أستاذ الفيزياء الحيوية - كلية العلوم - جامعة عين شمس .

الإشراف العام

- أ. محمد رشاد - المدير العام - مكتبة الدار العربية للكتاب .
أ. د. حسن أحمد شحاتة - مقرر الهيئة الاستشارية .
أ. محمد حجى - المشرف الفنى .
أ. زكريا القاضى - مدير النشر .
أ. محمد طنطاوى - مدير الإنتاج .

أساسيات الجيولوجيا الفيزيائية

أ.د. عبد الجليل عبد الحميد هويدى

أستاذ ورئيس قسم الجيولوجيا
كلية العلوم - جامعة الأزهر

أ.د. محمد أحمد حسن هيكل

أستاذ الجيولوجيا
كلية العلوم - جامعة الأزهر



مكتبة الدار العربية للكتاب
16 عبد الخالق ثروت تليفون: 23910250
فاكس: 23909618 - ص.ب 2022
E-mail: info@almasriah.com
www.almasriah.com

رقم الإيداع : 1607 / 2008
التراقيم الدولي : 8 - 598 - 293 - 977
جميع حقوق الطبع والنشر محفوظة
الطبعة الأولى : ربيع آخر 1429 هـ - أبريل 2008 م

بسم الله الرحمن الرحيم

◆ لماذا هذه السلسلة ؟ ◆

لقد كانت هناك دوافع كبيرة وكثيرة ، تدفعنا إلى إصدار هذه السلسلة عن العلوم الأساسية في : علم الكيمياء - علم الفيزياء - علم الرياضيات - علم النبات - علم الحيوان - علم الجيولوجيا ، باللغة العربية ، دوافع تجاوزت بكثير تلك المصاعب الجسام التي عانينا بعضاً منها ، ولازلنا نعانى بعضها الآخر .. تلك المتاعب التي تفرضها طبيعة إصدار مثل هذه الأعمال الضخمة المتشعبة الإنتاج .. الباهظة التكاليف .. الرفيعة المستوى والمتميزة .

وقد تمثلت الإجابة عن السؤال الذي يخطر ببال الجميع : زملاء في ميدان النشر .. مؤلفين يشاركوننا المسيرة .. قراء نعزز بتواصلهم معنا ، في كل ما نقدمه لهم من إصدارات جديدة يعقوهم .. في المحاور التالية :

* الإيمان العميق بالدور الحيوى الذى تسهم به هذه العلوم الأساسية في إحداث نهضة علمية لأمتنا العربية ، التى أصبحت في أشد الحاجة لتحقيق طفرة علمية ؛ لكى تلحق بالدول المتقدمة ، التى أخذت من الحضارة العربية والإسلامية العلوم الأساسية ونهضت بها ، وتأخرنا نحن عنها ؛ نتيجة ذلك الفقر الشديد الذى تعاني منه المكتبة العربية في نشر العلوم الأساسية باللغة العربية .. دون أن ينسحب ذلك على دعوة إلى إهمال اللغة الأصلية التى تصدر بها هذه العلوم ، لما في ذلك من دعوة إلى الانغلاق والتقوقع ، لا تليق مطلقاً ، بطلاب علم ومعرفة ، تتجدد أبعادها في كل لحظة نعيشها .. وتتوالى انشطاراتها في كل ثانية من حولنا .

* إصدار هذه السلسلة باللغة العربية ، بعد إسناد مسئولية هذه الإصدارات العلمية الراقية المستوى إلى كبار الأساتذة الأجلاء ، المشهود لهم بالمكانة العلمية والخبرة الأكاديمية ، التى حرصنا - كل الحرص - على أن تتضمن هذه المسئولية وجود هيئة استشارية ، على أعلى مستوى ، ترشح أكثر من أستاذ في التخصص الواحد ، وتقوم بتحكيم المادة العلمية ، وإجازة ما يتفق منها وقواعد النشر ، مع القيام بكل أعمال التنسيق والمتابعة .. إن الاحتكام إلى هذه المنظومة بكل تشابكاتها وأبعادها ليضمن للقارئ - المتخصص وغير المتخصص - مادة رفيعة المستوى ، وتواصل مع أحدث ما وصل إليه كل علم من العلوم ، التى تتضمنها إصدارات هذه السلسلة ، لتكمل مسيرة من سبقونا في نشر هذه العلوم الأساسية باللغة العربية ؛ الأمر الذى يضمن المواكبة لكل دقائق مستحدثة ونظريات مستحدثة في هذه العلوم .

* توجيه إصدارات هذه السلسلة إلى طلاب الجامعات والمعاهد بمصر وكافة البلدان العربية ، الذين يدرسون بكليات العلوم والتربية والزراعة والفرق الأولى والإعدادية بكليات الطب وطب الأسنان والصيدلة .. ذلك التوجيه المسبق بالحرص على ضرورة أن تغطي كل إصدارات جميع المفردات والعناوين والموضوعات التى يمكن أن تخاطب اهتمام أى طالب جامعى ، بأسلوب علمى دقيق ولغة سليمة .. ليشمل استفادة الطلاب - على

اختلاف دراساتهم أو جنسياتهم - الكاملة من الإصدارة .. كل ذلك في إشارة واضحة إلى ما اتوينا تحقيقه من البداية : العمل على تكوين الطالب الباحث ، القادر على نهل المعرفة من منابعها ومصادرها الحقيقية دون تشويه أو تزويد .

* لقد حرصنا على أن تتضمن كل إصدار من هذه السلسلة :

- جزءاً خاصاً بالمسائل والتباين المحلولة في نهاية كل فصل أو باب ، كلما كان ذلك ممكناً وضرورياً .
- جزءاً خاصاً بالأسئلة العامة والمسائل غير المحلولة في نهاية كل فصل أو باب ؛ حتى يتمكن الطالب من أن يقيّم مدى تحصيله .
- تثبيت الكتاب بالملاحق والجداول الخاصة .
- الإشارة إلى الكتب والمراجع ، التي يمكن للدارس أن يرجع إليها ؛ لمزيد من الاطلاع .
- تزويد الأشكال والرسومات بالإيضاحات اللازمة .
- ضرورة ذكر المراجع والمصادر العربية والأجنبية التي تمت الاستعانة بها ، مع ضرورة توضيح ذلك في النص والهوامش .
- ضرورة وجود ملحق كامل للمصطلحات التي تتناولها الإصدارة ، باللغتين العربية والإنجليزية ..

* كل هذا الحرص ليدل - بشكل واضح - على رغبتنا في أن نصل بالعمل إلى أعلى مستوياته ؛ لتحقيق لطالبنا الجامعي الأدوات والوسائل ، التي تعده خير إعداد لمواصلة رحلة البحث والعطاء ، والقدرة على التواصل مع تلك النظواهر العلمية المتتابة ، المضطردة ، والآخذة في النمو والتسارع .

* ومجاعة لأحدث تقنيات العصر ، يزمع القيام - في المستقبل - بإصدار «CD» ملحقة بكل ما يصدر بهذه السلسلة من مؤلفات ، حتى تتيح للطالب في الوقت نفسه أن يرى مادة الكتاب ونظرياته وما يعرض من علوم ومعارف متجسدة أمامه .. يسمعها ويراه ويتابعها في شكل حي ، وتمتحنه الفرصة لأن يقف على مستوى أدائه وتحصيله من خلال تقييمه الذاتي لهذا التحصيل ؛ مما يخلق لديه فرصة رائعة لأن يتفوق في هذا الفرع من العلم ؛ نتيجة مرعة الاستيعاب والفهم الدقيق لمكونات كل جزء من أجزاء الإصدارة ..

* ... وفي النهاية ... نصل إلى ذلك المحور ، الذي يحدونا دائماً في كل أعمالنا ، ألا وهو مسئوليتنا نحو قارئنا ومصرنا وأمتنا العربية بأسرها .. ولغتنا الأصيلة الغالية .. التي ندعو الله أن يحفظها دائماً لغة للعلم والحضارة والعطاء .. فقد كنا سادة لحضارة بنى الإنسان .. ولا نظن أن العودة إلى تلك المكانة مستحيلة ... والله ولي التوفيق .

الناشر

◆ تقديم ◆

شهد القرن العشرين عدداً من المحاولات الجادة والمخلصة ؛ من أجل أن تكون اللغة العربية لغة للعلم في العالم العربي ، من خلال تأليف أو ترجمة عدد لا بأس به من الكتب العلمية المهمة في مختلف فروع العلوم . إلا أن العلم بطبيعته متطور ومتغير ، ويشهد الجديد والتجديد كل صباح . بل إن العلم في العقود الأخيرة من القرن العشرين شهد قفزة ضخمة ؛ بسبب ثورة المعلومات واختراع الكمبيوتر (الحاسوب) ، وما تلاه من نشر شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت) . وهذا يستلزم أن تصدر كتب باللغة العربية تلاحق التطور العلمي وتنقله لدارسينا في الجامعات والمعاهد العربية بالمعدل نفسه الذي يصدر به في مختلف أنحاء العالم المتقدم ، حتى نساير النهضة العلمية العالمية ونسير في ركبها . ولا يكفى في هذه الحالة أن نهبّ مدفوعين بحماس ثورى ، نصدر عدداً من الكتب العلمية ، ثم نجو حماسنا وينضب لنجد أنفسنا وقد تخلفنا عن ركب العلم بأميال كثيرة . وإنما يجب أن تكون هناك حركة مستمرة دائبة يصدر عنها الجديد في كل مجالات العلوم باستمرار .

لهذه الأسباب قامت « مكتبة الدار العربية للكتاب » بإصدار « سلسلة العلوم الأساسية » ، وهى سلسلة من الكتب العلمية المتخصصة ، يختص كل منها بأحد فروع العلوم الأساسية . ويغطي الكتاب الذى بين أيدينا « أساسيات الجيولوجيا الفيزيائية » وهو منهج مهم لدارسى الجيولوجيا كمنهج مستقل أو مشترك مع مناهج أخرى لطلاب كليات العلوم أو الهندسة أو الزراعة أو التربية أو غيرها . ونأمل أن يغطي هذا الكتاب نقصاً في المكتبة العربية في كتب الجيولوجيا باللغة العربية نستشعره بشكل واضح ؛ خاصة تلك التى تهتم بمكونات الأرض ، ومناقشة الأحداث الجيولوجية التى أثرت عليها طوال تاريخها الطويل ، فى ضوء المعطيات العلمية الحديثة ، التى تم التوصل إليها خلال العقود الأخيرة من القرن العشرين .

وإننا إذ نقدم هذا الكتاب كمقدمة لدراسة علم الجيولوجيا فى المراحل الأولى الجامعية ، يحدونا أمل فى أن نكون قد أسهمنا بإضافة جديدة للمكتبة العربية ، وساعدنا فى وضع لبنة أساسية فى بناء مكتبة عربية فى مجال العلوم الجيولوجية .

وتود الهيئة الاستشارية تقديم وافر الشكر للدارسين ، ولكل من ساهم فى إصدار هذه السلسلة ، لما تثلته من إثراء للمكتبة العربية ومساهمة بناءة فى رفع مستوى التعليم الجامعى فى العالم العربى .

والله ولى التوفيق ،،،

الهيئة الاستشارية

علم الجيولوجيا

مقدمة

العربي الكبير ، ولما شعر به من فقر المكتبة العربية في كتب تقدم المعلومات الأساسية عن كوكب الأرض بلغة الضاد ، فقد سعينا لنقدم هذا المؤلف بلغة عربية سهلة ميسرة تبتعد عن استخدام مصطلحات فنية صعبة أو لغة معقدة في شرح الظواهر المختلفة حتى نيسر للجميع قراءته واستيعابه .

ويعتمد علم الجيولوجيا أساسا على الملاحظات ، كما تحتاج كتبه إلى كثير من الصور والأشكال التوضيحية والخرائط ، ولذا حرصنا دائما أن تكون المواد التوضيحية وفيرة وواضحة ، بل وحاولنا جاهدين أن تكون تلك المواد من منطقتنا العربية عموما ومصر خصوصا لتكون أكثر واقعية وتأثيرا .

ولأن هذا الكتاب طلابي في الأساس ، فقد ذلنا كل فصل بملخص لمحتوى الفصل ومجموعة من الأسئلة التي تيسر على الطالب عملية المراجعة والاستذكار وقائمة بالمصطلحات المهمة التي وردت في ثنايا الفصل ووضعت بحروف سوداء لتوضيحها . كما يتضمن الكتاب في نهايته معجما بالمصطلحات المهمة التي وردت بالكتاب ، بالإضافة إلى بعض المصطلحات الأخرى التي قد يحتاجها الطالب . ولإطلاع الطالب على أحدث المعلومات الجيولوجية التي تضعه في واجهة الأحداث ، ذلنا كل فصل بقائمة بمجموعة من المواقع الإلكترونية على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت) التي تعرض أحدث ماصدر في موضوع الفصل.

الأرض جرم صغير جدا يسبح في الكون الفسيح ، إلا أنه المكان الوحيد المعروف حتى الآن أنه يوجد عليه ماء في الحالة السائلة ، وبالتالي توجد عليه حياة ، والأهم أنه مسكننا وماوانا نحن البشر . فمن الأرض نستمد الموارد اللازمة لبناء حضارتنا الحديثة ، وكذلك المستلزمات الضرورية لوجود الحياة واستمرارها فوق سطحها . ولهذا ، فإن معرفتنا بكوكبنا تعتبر مسألة جوهرية وأساسية لعيشنا عليه . ويسهم علم الجيولوجيا بنصيب وافر في إمدادنا بالمعلومات التي تساعدنا على فهم كوكب الأرض .

وتعمل وسائل الإعلام الحديثة في العقود الأخيرة على وضعنا في قلب الأحداث من بعض القوى الجيولوجية النشطة على سطح الأرض ، وما نشاهده من أعداد ضخمة من البشر تُركوا بلا مأوى بعد ثورات البراكين أو الهزات الأرضية العنيفة الناتجة عن الزلازل أو الفيضانات . مثل هذه الأحداث والكثير غيرها تدمر الحياة والمنشآت القائمة ، مما يحتم ضرورة أن يكون لدينا فهم جيد لها وقدرة على التعامل الرشيد معها لتجنب أو التقليل من أثارها المدمرة . ويتطلب الاستعداد لهذه الأحداث معرفة ماذا قدم العلم ونظرياته لفهم كوكب الأرض بصمخوره وجباله وأغلفته : الجوى والمائى والحيوى .

ولأن كوكب الأرض يسكنه كل البشر على اختلاف ألوانهم وألسنتهم ، والجيولوجيا هي العلم الذى نستمد من خلاله معلوماتنا عن كوكبنا ، وللحاجة الماسة إلى نشر وعى ثقافى وعلمى عن كوكب الأرض في وطننا

الأخر. وقد قام بمراجعته د. على فراج عثمان أستاذ مساعد الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة عين شمس .

الفصل الرابع: ويتناول دراسة الصخور النارية وأنواعها وكيفية تكوّن الصهارات ومواضعها وأشكال التداخلات الصهارية وعلاقة الصخور النارية بتكتونية الألواح. وقد قام بمراجعته د. على فراج عثمان أستاذ مساعد الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة عين شمس .

الفصل الخامس: ويقوم على دراسة البراكين وأنواع السواد الناتجة عنها والظواهر البركانية المختلفة، والمخاطر الناجمة عن ثورات البراكين وطرق تجنب آثارها المدمرة. وقد قام بمراجعته أ. د. باهر عبد الحميد القليوبى أستاذ الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة عين شمس .

الفصل السادس: ويتضمن دراسة لعمليات التجوية والتعرية باعتبارها وسيلة أساسية لهدم الصخور وتفتيتها كمقدمة لتكوين الصخور الرسوبية. وقد قام بمراجعته أ. د. عبد المحسن عثمان زيكو أستاذ الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة الزقازيق.

الفصل السابع: ويتناول الصخور الرسوبية وأنواعها وبيئات ترسيبها والتركيب الرسوبية المختلفة. وقد قام بمراجعته أ. د. محمد محمود أبو زيد أستاذ الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة عين شمس .

الفصل الثامن: ويتناول الصخور المتحولة وأنواعها والعوامل المؤثرة في تكوينها وأنسجتها وعلاقتها بتكتونية الألواح. وقد قام بمراجعته أ. د. باهر عبد الحميد القليوبى أستاذ الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة عين شمس .

الفصل التاسع: ويقوم على دراسة تاريخ الأرض وطرق قياس الأعمار الجيولوجية نسبية أو مطلقة

وجدير بالملاحظة أن وضع كتاب يضم موضوعات جيولوجية متعددة يجذب انتباه وحساس القارئ، ويضيف إلى معلوماته العلمية يمثل تحديا كبيرا للقائمين به . ولنكون مطمئنين لتناسب هذا المحتوى العلمى المتنوع مع قدرات القراء سواء كانوا طلابا أو باحثين عن المعرفة بشكل عام طلبنا من الزملاء المتخصصين في مختلف التخصصات التى يناقشها الكتاب بمراجعة فصول الكتاب كل في مجال تخصصه ، حتى يظهر الكتاب بالشكل المطلوب وبالذقة العلمية واللغوية المنشودة . ونعرض فيما يلى مختصرا بفصول الكتاب مع توجيه شكر خاص وعرفان بالجميل لكل من هؤلاء الأساتذة الزملاء الأعزاء الذين نعتز بأرائهم ومقترحاتهم التى ساهمت كثيرا في أن يظهر الكتاب بصورته الحالية .

الفصل الأول: ويتناول مقدمة عامة توضح ميكانيكية عمل الأرض وعرضا مختصرا لنظرية تكتونية الألواح التى تفسر الآن مختلف العمليات الجيولوجية التى تجري على الأرض . وقد قام بمراجعة هذا الفصل أ. د. ممدوح عبد الغفور حسن أستاذ الجيولوجيا بهيئة المواد النووية .

الفصل الثانى: ويتم بدراسة المعادن وتركيبها الكيميائى وتركيبها الذرى وطرق تصنيفها وخواصها الفيزيائية ، بالإضافة لاستخدام المعادن كأدلة على بيئات التكوين. وقد قام بمراجعته أ. د. محمد عبد الحميد الشرقاوى أستاذ المعادن بكلية العلوم - جامعة القاهرة

الفصل الثالث: ويتم بدراسة أنواع الصخور الثلاثة: النارية والرسوبية والمتحولة ، مع التركيز على دورة الصخور التى تحكم ميكانيكية تكوّن أحدها من

الفصل الخامس عشر: ويحتوى على دراسة الرياح والصحارى والعمل الجيولوجى لكل منها وظاهرة التصحر وطرق مقاومتها . وقد قام بمراجعته أ.د. عمود محمد عاشور الأستاذ بقسم الجغرافيا بكلية الآداب - جامعة عين شمس .

الفصل السادس عشر: ويتناول دراسة الزلازل ونشأتها وتوزيعها وطرق توقعها ، واستخدام الزلازل فى التعرف على التركيب الداخلى للأرض . وقد قام بمراجعته أ.د. مهدي عبد الرحمن قرطام أستاذ الجيوفيزياء بكلية العلوم - جامعة عين شمس .

الفصل السابع عشر: ويتناول تكتونية الألواح وتتبع الفكر الجيولوجى حتى ظهور تلك النظرية التى ساهمت فى تفسير الكثير من العمليات الجيولوجية . كما نوقشت طبيعة الحدود الفاصلة بين الألواح وحركتها وعلاقتها بالرواسب المعدنية . وقد قام بمراجعته أ.د. عادل رمضان مصطفى أستاذ الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة عين شمس .

الفصل الثامن عشر: ويتناول تكتونية القشرة الأرضية وعمليات بناء الجبال وخسف القارات والحركات الرأسية الإقليمية . وقد قام بمراجعته أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن الأستاذ بهيئة المواد النووية .

الفصل التاسع عشر: ويتناول مصادر الطاقة وأنواعها والمصادر البديلة لها والثروة المعدنية وأصلها وعلاقتها بتكتونية الألواح . وقد قام بمراجعته أ.د. محمود يبرى زين الدين أستاذ الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة الأزهر وأ.د. ممدوح عبد الغفور حسن الأستاذ بهيئة المواد النووية .

وكيف بنى العمود الجيولوجى والتصنيف الطبقي للصخور . وقد قام بمراجعته أ.د. عبد المحسن عثمان زيكو أستاذ الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة الزقازيق .

الفصل العاشر: ويهتم بدراسة مراحل تشوه الصخور وأنواع التشوهات مثل الطيات والصدوع وغيرها وميكانيكية حدوث تلك التشوهات . وقد قام بمراجعته أ.د. عادل رمضان مصطفى أستاذ الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة عين شمس .

الفصل الحادى عشر: ويتناول الانهيارات الكتلى وأسباب تحرك الكتل والعمليات التى تؤدى إلى حدوث ذلك ، وأنواع الانهيارات ، ووسائل تجنب المخاطر الناشئة عنها . وقد قام بمراجعة هذا الفصل أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن أستاذ الجيولوجيا بهيئة المواد النووية .

الفصل الثانى عشر: ويهتم بدراسة دورة الماء فى الطبيعة والمجارى المائية وأنواعها ، وأنظمة الصرف المختلفة ونشأة وتطور نهر النيل . وقد قام بمراجعته أ.د. عمود محمد عاشور الأستاذ بقسم الجغرافيا بكلية الآداب - جامعة عين شمس .

الفصل الثالث عشر: ويحتوى على دراسة المياه الجوفية وظروف تكوينها ونوعياتها والعمل الجيولوجى لها . وقد قام بمراجعته أ.د. إبراهيم زكريا الشامى أستاذ الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة حلوان .

الفصل الرابع عشر: ويتناول دراسة المشاكل والظروف الجيولوجية التى تؤدى إليها وتؤثر عليها وأسباب حدوث التلجج فى العصور الجليدية . وقد قام بمراجعته أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن الأستاذ بهيئة المواد النووية .

الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة عين شمس على
المجهود الذى بذله فى إعداد المواقع على شبكة
المعلومات الدولية (الإنترنت) التى يمكن الاطلاع
عليها لمزيد من المعلومات حول الموضوع الذى يعالجه
كل فصل من فصول الكتاب .

المؤلفان

يناير 2007م

ويطيب لنا أن نتقدم بالشكر خاص إلى الأستاذ
الدكتور/ مدوح عبد الغفور حسن الأستاذ بهيئة المواد
التنوية لمراجعته متن الكتاب وملاحظاته القيمة . كما
نشكر الدكتور/ ضياء الدين محمد كامل والدكتور/
ثروت حلمى عبد الحفيظ والدكتور / إسلام محمد
درغام المدرسون بقسم الجيولوجيا - جامعة الأزهر لما
قدموه من دعم فى إعداد وتصوير العينات الصخرية
وبعض الأشكال التوضيحية الواردة فى الكتاب . كما
نتقدم بالشكر للدكتور/ على فراج عثمان أستاذ مساعد

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿ إِنَّمَا تَخْشَى اللَّهَ مِنْ عِبَادِهِ الَّذِينَ عَلَّمُوا ﴾

بِسْمِ اللَّهِ
الرَّحْمَنِ
الرَّحِيمِ

(سورة فاطر : 28)

المحتويات

الفصل الأول

مقدمة

- 40 I. أصل النظام الكوكبي :
42 أ- الفرضية السديمية
43 ب- نشأة الكواكب
45 II. تطور كوكب الأرض :
46 أ- نماذج الأرض
46 ب- أغلفة الأرض مختلفة التركيب الكيميائي
47 ج- أغلفة الأرض مختلفة الخصائص الفيزيائية
50 د- نشأة القارات والمحيطات والغلاف الجوي
56 III. ديناميكية عمل كوكب الأرض : الأرض داتبة الحركة :
56 أ- نظرية الكوارث ومبدأ الوتيرة الواحدة :
58 ب- تكتونية الأنواع : نظرية شاملة لعلم الجيولوجيا
60 1- حركات الألواح
61 2- حدود الألواح
65 IV. التفاعلات بين طبقات الأرض الداخلية والخارجية :

الفصل الثاني

المعادن : الوحدة البنائية للصخور

- 74 I. تعريف المعدن
75 II. المعادن وتركيبها الكيميائي :
76 أ. تركيب الذرات
77 ب. العدد الذري والكتلة الذرية

77	III. التفاعلات الكيميائية :
78	أ. اكتساب أو فقد الإلكترونات
80	ب. المساهمة في الإلكترونات
80	ج. الجدول الدوري للعناصر
83	IV. الروابط الكيميائية :
83	أ. الروابط الأيونية
83	ب. الروابط التساهمية
85	V. التركيب الذري للمعادن :
85	أ. طريقة تكوين المعادن
90	ب. الإحلال الأيوني
91	VI. المعادن المكونة للصخور :
93	أ. السيليكات
93	ب. الكربونات
93	ج. الأكاسيد
93	د. الكبريتيدات
93	هـ. الكبريتات
103	VII. الخواص الفيزيائية للمعادن :
103	أ. الصلادة
104	ب. الانفصام
107	ج. المكسر
108	د. البريق
108	هـ. اللون والمخدش
109	و. الكثافة والكثافة النوعية
110	ز. هيئة البلورة
111	VIII. المعادن كأدلة على بيئات التكوين

الفصل الثالث

الصخور : سجل العمليات الجيولوجية

- 117 ا. الصخور النارية :
- 118 أ. الصخور النارية المتداخلة ..
- 119 ب. الصخور النارية المنبثقة ..
- 120 ج. الصخور النارية الشائعة ..
- 120 II. الصخور الرسوبية :
- 121 أ. الرواسب الفتاتية ..
- 121 ب. الرواسب الكيميائية والكيميائية الحيوية ..
- 122 ج. التصخر : تحول الراسب إلى صخر صلب ..
- 124 د. الصخور الرسوبية الشائعة ..
- 124 III. الصخور المتحولة :
- 124 أ. التحول الإقليمي والتحول التماسي (الحرارى) ..
- 125 ب. الصخور المتحولة الشائعة ..
- 126 IV. تواجد الأنواع المختلفة للصخور :
- 127 V. دورة الصخور :
- 130 أ. دورة الصخور وتكتونية الألواح ..

الفصل الرابع

الصخور النارية

- 137 ا. تصنيف الصخور النارية :
- 137 أ- النسيج :
- 141 1 - الصخور النارية المتداخلة ..
- 141 2 - الصخور النارية المنبثقة (البركانية) ..
- 142 ب- التركيب الكيميائي والمعدني :
- 145 1 - الصخور الفلسية ..
- 145 2 - الصخور النارية المتوسطة ..

- 146 3- الصخور المافية
- 146 4- الصخور فوقالمافية
- 147 II. كيف تتكون الصهارات؟
- 148 أ- كيف تنصهر الصخور؟
- 149 ب- تكوّن غرف الصهارة
- 150 III. التمايز الصهاري :
- 151 أ- سلسلة التفاعل المتصلة
- 152 ب- سلسلة التفاعل غير المتصلة
- 153 ج- التبلور التجزئى
- 156 د- نظرية بوين للتمايز الصهاري
- 156 هـ- النظريات الحديثة منذ نظرية بوين
- 158 و- التمثل واختلاط الصهارات
- 159 IV. مواضع تكون الصهارات وأنواعها :
- 160 1- أصل الصهارة البازلتية
- 160 2- أصل الصهارة الأنديزيتية
- 161 3- أصل الصهارة الريوليتية
- 162 V. أشكال المتداخلات الصهارية :
- 162 أ- البلوتونات
- 164 1- الباثوليثات
- 165 2- الجدد الموازية والقواطع
- 167 ب- العروق
- 167 VI. النشاط الناري وتكتونية الألواح

الفصل الخامس

البراكين

- 177 I. مصدر اللابات
- 179 II. الصخور والغازات التي تقذفها البراكين :

179	أ- الغازات .
179	ب- اللابات .
180	1- أنواع اللابات
185	2- أنسجة اللابات
185	ج- الرواسب الفتاتية التارية :
185	1- المقذوفات البركانية
188	2- فيض الفتات الناري
191	III. أنواع الانبثاقات ومعالمها
192	أ- الانبثاقات المركزية :
192	1- البراكين الدرعية
192	2- القباب البركانية
193	3- مخاريط الحمم الفتاتية
193	4- البراكين المركبة
194	5- فوهات البراكين والمعالم البركانية الأخرى
197	ب- الانبثاقات الشقية :
197	1- بازلت فيضي (المضاب البازلتيه)
198	2. رواسب فيض الرماد
198	ج- بعض الظواهر البركانية الأخرى
198	1- اللاهار
198	2- الداخنات والينابيع الحارة والفوارات (الجيزارات)
200	IV. التبركن وتكتونية الألواح :
201	أ- التبركن عند حدود الألواح المتباعدة (تبركن نطاق الانتشار)
203	ب- التبركن عند الحدود المتقاربة (تبركن نطاق التقارب) :
203	1- التبركن في التقارب المحيطي - المحيطي
204	2- التبركن في التقارب المحيطي - القاري
204	3- التبركن داخل الألواح

205	V. البراكين والمناخ.....
206	VI. تقليل مخاطر كوارث البراكين
207	VII. الاستفادة من البراكين

الفصل السادس

التجوية والتعرية

216	I. التجوية والتعرية ودورة الصخور
217	II. العوامل التي تؤثر في التجوية :
217	أ. خصائص الصخر الأصلي
219	ب. المناخ : هطول المطر ودرجات الحرارة
219	ج. وجود أو عدم وجود التربة
220	د. الزمن : فترة التعرض
221	III. التجوية الكيميائية :
222	أ. عمليات التجوية الكيميائية
225	ب. تأثير التجوية الكيميائية على الصخور الشائعة :
225	1 - تركيز المعادن المستقرة
225	2 - لحاء التجوية
226	3 - التقشر والتجوية الكروية
227	4 - أشكال السطح نتيجة التفاعل مع صخور الكربونات
227	ج. الاستقرار الكيميائي : التحكم في سرعة التجوية
227	1 - الاستقرار الكيميائي
229	2 - سلسلة استقرار المعادن الشائعة المكونة للصخور
230	IV. التجوية الطبيعية :
230	أ. التجوية الطبيعية في المناطق الجافة
231	ب. التجوية الطبيعية في باقي المناطق
231	ج. العوامل التي تحدد طريقة تكسر الصخور :
231	1. نطاقات الضعف الطبيعية

232	2. نشاط الكائنات الحية
232	3. التردد الصقيعي
232	4. تبلور المعدن
234	5. تعاقب الحرارة والبرودة (التمدد الحرارى)
234	6. القوى الأخرى
234	د. التجوية الطبيعية والتعرية
234	V. التربة : راسب متبق من التجوية :
235	أ. قطاع التربة
236	ب. المناخ والزمان وأنواع التربة :
236	1. المناخ الرطب : اللاتريت
238	2. المناخ الجاف : البيدوكال
238	3. المناخ المعتدل : البيدالفير
239	ج. التربة القديمة : كدليل على المناخ فى الأزمنة القديمة
239	VI. الرواسب المعدنية المتكونة بالتجوية :
239	أ. الإثراء الثانوى
240	ب. تركيز الماس
240	VII. الإنسان كعامل من عوامل التجوية

الفصل السابع

الرواسب والصخور الرسوبية

248	أ. الصخور الرسوبية ومراحل تكوينها
249	أ. التجوية والتعرية :
249	1 - الرواسب الفتاتية
250	2. الرواسب الكيميائية والرواسب الكيميائية الحيوية
250	ب. النقل والترسيب : رحلة إلى مواقع الترسب :
251	1. التيارات كعوامل لنقل الحبيبات الفتاتية
251	2. المثالج كعوامل لنقل الحبيبات الفتاتية

252	3. السوائل : كوسائل لنقل المواد المذابة.....
252	4. المحيطات : خزانات ضخمة للخلط الكيميائي.....
253	ج. الدفن وتغيرات ما بعد الترسيب : التحول من راسب إلى صخر رسوبي :
253	1. الدفن نتيجة تراكم الرواسب.....
	2. تغيرات ما بعد الترسيب : تحول الراسب إلى صخر بالحرارة والضغط والتغيرات
253	الكيميائية.....
256	II. الرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية :
256	أ. شكل الحبيبة
256	ب. الفرز.
258	ج. تصنيف الرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية :
258	1. الفتاتيات خشنة التحبب : الجروول والكونجلومرات.....
259	2. الفتاتيات متوسطة التحبب : الرمل والحجر الرملى.....
263	3. الفتاتيات دقيقة التحبب : الغرين وحجر الغرين والطين والحجر الطيني والطفل . .
264	III. الرواسب والصخور الرسوبية الكيميائية والكيميائية الحيوية :
264	أ. تصنيف الرواسب والصخور الرسوبية الكيميائية والكيميائية الحيوية :
265	1. الرواسب والصخور الرسوبية الكربوناتية : الحجر الجيري وحجر الدولوميت .
269	2. الرواسب والصخور الرسوبية التبخيرية.....
272	3. الرواسب السيليكية : مصدر للتشترت
273	4. تكوين الرواسب بعملية ما بعد الترسيب : فوسفوريت
273	5. رواسب أكسيد الحديد : مصدر متكون الحديد
273	6. المادة العضوية مصدر للفحم والنفط والغاز
273	IV. التراكيب الرسوبية :
274	أ. التطبيق
247	ب. التطبيق المقاطع.....
275	ج. التطبيق المتدرج
276	د. علامات النيم

- 276 هـ. تراكيب التقلب الحيوى (الاضطراب الحيوى)
- 277 و. تشققات الطين ..
- 277 ز. التتابعات الطبقة
- 279 V. بيئات الترسيب والسحنات الرسوبية :
- 280 أ. البيئات القارية
- 282 ب. بيئات خط الشاطئ
- 283 ج. البيئات البحرية
- 283 د. السحنات الرسوبية : تواجد مجموعة من البيئات الرسوبية مع بعضها بعضا
- 284 VI. الترسيب وتكتونية الألواح

الفصل الثامن

الصخور المتحولة : صخور جديدة من أخرى سابقة

- 293 I. حدود التحول
- 295 II. العوامل الطبيعية والكيميائية التى تتحكم فى عملية التحول :
- 295 أ. درجة الحرارة
- 296 ب. الضغط
- 297 ج. التغيرات الكيميائية أثناء التحول
- 298 III. أنواع التحول : ...
- 298 أ. التحول الإقليمي
- 299 ب. التحول التماسى (الحرارى)
- 301 ج. التحول التشمسى
- 302 د. التحول الحرمانى
- 302 هـ. التحول بالدفن
- 302 IV. أنسجة التحول : ..
- 304 أ. الأنسجة المتورقة :

1. الإردواز 2. الفليت 3. الشست 4. النيس

- 307 ب. الأنسجة غير المتورقة (الجرانولاستيتية) : ..

1. الهورنفلس 2. الكوارتزيت 3. الرخام 4. الأرجليت 5. الحجر الأخضر

6. الأمفيبوليت 7. الجرانوليت 8. السربستينيت 9. حجر الصابون

- 310 ج. أنسجة البلورات الكبيرة (بورفيروبلاست)
- 310 د. أنسجة الشبوة (الطحن)
- 310 V. التحول الإقليمي ورتبة التحول :
- 311 أ. أيزوجراد (خط تساوي رتبة التحول) : عمل خرائط لنطاقات التحول
- 313 ب. رتبة التحول وتركيب الصخر الأصلي
- 314 ج. سحنات التحول
- 318 VI. نطاقات التحول بالتماس :
- 318 أ. حالات التحول (هالات التماس)
- 318 ب. رتبة التحول وتركيب الصخر الأصلي
- 320 VII. التحول وتكتونية الألواح :

الفصل التاسع

الزمن الجيولوجي

- 330 I. العمر النسبي :
- 331 أ. السجل الطبقي (الاستراتجرافي) :
- 331 1. القواعد الأساسية لتحديد العمر النسبي
- 334 2. عدم التوافق
- 338 II. مضاهاة الوحدات الصخرية
- 342 III. العمر المطلق :
- 342 أ. أسس التقدير الإشعاعي
- 343 ب. الاضمحلال الإشعاعي
- 346 ج. سلاسل الاضمحلال الإشعاعي الرئيسية
- 347 د. تحديد العمر باستخدام الكربون المشع
- 349 هـ. تحديد العمر باستخدام مسارات الانشطار
- 349 و. تحديد العمر باستخدام الأحماض الأمينية
- 350 IV. العمود الجيولوجي ومقياس الزمن الجيولوجي :
- 350 أ. بناء مقياس الزمن الجيولوجي

- 353 ب. مشكلات تحديد الأعمار في مقياس الزمن الجيولوجي
- 354 V. التصنيف الطبقي (الاستراتيجي)

الفصل العاشر

تشوه الصخور : الطيات والصدوع

وتراكيب أخرى كسجل لتشوه الصخور

- 364 I. كيف تشوه الصخور ؟
- 364 أ. الإجهاد والانفعال
- 365 ب. مراحل التشوه :
- 365 1. التشوه المرن .
- 366 2. التشوه اللدن
- 367 3. التكسر .
- 367 ج. المواد اللدنة والمواد القصيفة (سريعة الكسر) :
- 368 1. الحرارة
- 368 2. الإجهاد الجانبي
- 368 3. الزمن ومعدل الانفعال
- 368 4. التركيب
- 369 د. صفات التقصف واللدونة في الغلاف الصخري
- 369 II. تفسير نتائج الحقل :
- 370 أ. قياس المضرب والميل
- 370 ب. عمل خريطة جيولوجية وقطاع عرضي
- 372 III. التشوه بالتشي : طي الصخور :
- 372 أ. أنواع الطيات
- 378 ب. الاستنتاجات من طي الصخور
- 379 III. التشوه بالكسر : الفواصل والصدوع :
- 381 أ. الفواصل
- 382 ب. الصدوع :

- 384 1. تصنيف الصدوع ..
- 387 2. الأدلة على حدوث الحركة على امتداد الصدوع ..
- 388 3. العلاقة بين الطيات والصدوع ..
- 388 ٧. تفسير التاريخ الجيولوجي ..

الفصل العاشر

الانهيال الكتلى

- 398 I. أسباب تحرك الكتل :
- 399 أ. طبيعة المواد المكونة للمنحدرات :
- 399 1. المواد غير المتماسكة ..
- 401 2. المواد المتماسكة ..
- 402 ب. المحتوى المائي ..
- 402 ج. شدة ميل المنحدرات وعدم استقرارها ..
- 403 د. بادئات (محفزات) التحرك الكتلى ..
- 404 II. تصنيف عمليات الانهيار الكتلى :
- 404 أ. انهيار المنحدرات :
- 405 1. السقوط الصخرى ..
- 405 2. الانزلاقات ..
- 408 ب. انسيابات الرواسب :
- 409 1. انسيابات الطين المائع (الرذغة) ..
- 411 2. الانسيابات الحبيبية ..
- 413 ج. الانهيار الكتلى فى المناخات الباردة ..
- 413 1. الانتفاخ الصقيعى والزحف ..
- 413 2. المتالح الصخرية ..
- 414 د. الانهيار الكتلى تحت الماء :
- 415 III. الانهيار الكتلى وتكوينية الألواح ..
- 415 IV. تجنب أو تخفيف آثار الانهيار الكتلى ..

الفصل الثاني عشر

دورة الماء والأنهار

- 423 أولا : الانسيابات وخزانات المياه
- 424 ا. دورة الماء
- 425 II. كمية الماء المستخدم
- 426 ثانيا : الأنهار والنقل إلى المحيطات
- 427 ا. المعالم الرئيسية للنظام النهري :
- 427 أ. نظام التجميع
- 427 ب. نظام النقل ..
- 429 ج. نظام التشتت (التوزيع)
- 429 II. انسياب الماء في مجارى المياه الطبيعية :
- 429 أ. التصريف : معدل تحرك الماء ..
- 433 ب. السرعة التى يتحرك بها الماء
- 434 ج. شكل وحجم قناة المجرى المائى .
- 434 د. انحدار قناة المجرى المائى ..
- 437 هـ. مستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية) ..
- 438 و. الحمولة
- 439 III. أشكال القنوات النهرية :
- أ. القنوات المستقيمة
- 440 ب. القنوات المنعطفة أو المتنية
- 441 ج. القنوات المجدولة أو المضفرة
- 442 IV. التعرية بالمجارى المائية :
- 443 أ. البرى
- 443 ب. التجوية الكيميائية والطبيعية
- 444 ج. التقوض الناشئ عن تأثير التيارات
- 444 V. حولة المجارى المائية :

- 444 أ. حولة القاع.....
- 446 ب. الحمولة المعلقة.....
- 446 ج. الحمولة الذاتية.....
- 446 د. التغير في حجم الحبيبات وتركيب الرواسب في اتجاه مصب النهر ..
- 448 VI. رواسب المجارى المائية :
- 448 أ. السهول الفيضانية والجسور الطبيعية
- 448 ب. الشرفات (المصاطب النهرية)
- 449 ج. المراوح الطمئية.....
- 452 د. الدلتاوات
- 456 VII. أنظمة الصرف :
- 457 أ. أحواض الصرف وخطوط تقسيم المياه
- 458 ب. أنماط الصرف.....
- 458 ج. أنماط الصرف والتاريخ الجيولوجي
- 459 VIII. نهر النيل بمصر :
- 459 أ. نشأة وتطور نهر النيل
- 462 ب. تطور دلتا النيل

الفصل الثالث عشر

المياه الجوفية

- 469 I. المياه الموجودة تحت سطح الأرض :
- 470 أ. منشوب الماء الجوفى
- 472 II. كيف يتحرك الماء في التربة والصخور؟
- 473 أ. حركة الماء في نطاق التهوية
- 473 ب. حركة الماء في نطاق التشبع
- 474 ج. سرعة انسياب المياه الجوفية
- 475 III. تصنيف الطبقات الجيولوجية حسب قدرتها على حمل المياه الجوفية :
- 475 أ. مكامن المياه الجوفية ..

- 477 ب. بعض خصائص مكانم المياه الجوفية.
- 479 ج. الانسياب الارتوازي
- 480 IV. العلاقة بين مكانم المياه الجوفية والمياه السطحية :
- 481 أ. التوازن بين إعادة الملاء والتصريف
- 484 ب. التصريف الطبيعي (الينابيع) والصناعي (الآبار) :
- 484 1. الينابيع
- 485 2. الآبار
- 485 V. نوعية (درجة جودة) الماء وتلوث المياه الجوفية :
- 485 أ. كيميائية المياه الجوفية
- 486 ب. التلوث بمخلفات المجارى
- 487 ج. النفايات السامة والسموم الزراعية
- 487 د. تخزين النفايات الخطرة تحت الأرض
- 488 VI. العمل الجيولوجي للمياه الجوفية
- 488 أ. الذوبان
- 489 ب. التلاحم والإحلال الكيميائي
- 489 ج. الكهوف والمغارات الكربوناتية
- 490 د. رواسب الكهوف
- 491 هـ. الحفر الباليوعية
- 492 و. طبوغرافية الكارست
- 492 VII. الماء الموجود فى أعماق القشرة الأرضية
- 493 أ. المياه الحرثائية

الفصل الرابع عشر

المتائج : عمل الجليد

- 503 أ. تحول الثلج إلى جليد المثليجة : الجليد باعتباره صخرًا :
- 505 أ. أنواع المتائج :
- 506 1. مثالج الوادى

507	2. المثلج القارية والرفوف الجليدية
509	ب. كيفية تكون المثلج
510	ج. نمو المثلج : التراكم
510	د. انكماش المثلج : النفاد
511	هـ. تغيير حجم المثلج : العلاقة بين التراكم والنفاد
511	و. المثلج : مصادر متحركة للماء في المناطق الفقيرة به
512	II. حركة المثلج :
512	أ. ميكانيكية الانسياب الجليدى
512	III. التلج ومعالم الأرض الجليدية :
513	أ. التجوية الجليدية ومعالم التعرية :
513	1. معالج التجوية الجليدية الصغيرة
514	2. المعالم الأرضية للجبال المتثلجة
515	3. المعالم الجليدية الناشئة عن المثلج القارية والقلنسوات الجليدية
516	ب. نقل الرواسب بالمثلج
517	ج. الرواسب الجليدية :
517	1. الرواسب المتكونة بالجليد
518	2. الرواسب المتكونة بالماء : المنجرفات المتطبقة
519	3. تربة الصقيع الدائم
519	IV. العصور الجليدية : تثلج البليستوسين :
519	أ. مثال العصر الجليدى
520	ب. تحولات المجارى المائية والبحيرات الجليدية
520	ج. انخفاض مستوى سطح البحر
521	د. تشوه القشرة الأرضية
522	هـ. التلجعات المبكرة :
522	1. الدليل من قاع البحر
523	2. التلجعات قبل حين البليستوسين

523	..... أسباب حدوث العصور الجليدية :
523	..... أ. العصور الجليدية وتغير وضع القارات
525	..... ب. العصور الجليدية والنظرية الفلكية
525	..... ج. تركيب الغلاف الجوي
526	..... د. التغيرات في دوران المحيطات

الفصل الخامس عشر

الرياح والصحارى

535	..... ا. العمل الجيولوجى للرياح :
535	..... 1 - نظام الرياح على كوكب الأرض :
536	..... 1. نمط الرياح فوق سطح الكرة الأرضية
537	..... 2. أحزمة الرياح
539	..... 3. تأثير كوريولس
540	..... 4. تأثير السلاسل الجبلية
540	..... ب - حركة الرواسب بالرياح :
541	..... 1. نقل الرمال بالرياح
543	..... 2. نقل التراب بالرياح
544	..... ج - التعرية بالرياح :
544	..... 1. التذرية
545	..... 2. سفع الرمال
547	..... د - الترسيب بالرياح (الرواسب الريحية) :
548	..... 1. الكثبان الرملية
548	..... 2. بحار الرمال
555	..... 3. لويس : الأتربة المتساقطة
556	..... 4. الرماد البركانى
556	..... II. الصحارى :
556	..... أ - مناطق تواجد الصحارى

558	ب - مناخ الصحراء
558	ج - التجوية في الصحراء
559	1. المجارى المائية عامل تعرية مهم في الصحارى
560	د - الرواسب والترسيب في الصحارى
561	III. معالم الأرض في الصحارى :
562	أ - المراوح الفيضانية (الطمية) والبجادا (المنحدرات الطمية)
562	ب - البيدمنت (السفوح الجبلية)
564	ج - الجبال المنعزلة (الجزيرية)
564	د - الميسات (الربوات) والبيوتات (التلال التضيدية)
565	IV. التصحر

الفصل السادس عشر

الزلازل وتركيب الأرض

575	I. الزلازل :
575	أ. نشأة الزلازل
577	ب. دراسة الزلازل
577	1. السيزموجراف (مسجل الزلازل)
578	ج. الموجات الزلزالية
578	1. الموجات الأولية
578	2. الموجات الثانوية
580	3. الموجات السطحية
582	د. قياس شدة وقدر الزلزال :
582	1. شدة الزلزال
584	2. قدر الزلزال
585	هـ. الدمار الناشئ عن الزلزال
588	و. تحديد نوع التصدع من نتائج الزلزال
589	II. توزيع الزلازل حول العالم

592	..... III. الزلازل وتكتونية الألواح :
592	..... أ. الأحزمة الزلزالية عند حدود الألواح :
592	..... 1. الزلازل الضحلة البؤرة عند الحواف المتباعدة
593	..... 2. الزلازل الضحلة البؤرة عند حواف الصدوع الناقلة
593	..... 3. الزلازل العميقة البؤرة عند الحدود المتقاربة
594	..... 4. الزلازل الضحلة البؤرة داخل الألواح
595	..... VI. توقع الزلازل :
595	..... أ. توقع الزلازل على أساس إحصائي
595	..... ب. توقع الزلازل على أساس فيزيائي
596	..... ج. توقع الزلازل على أساس بيوفيزيائي
596	..... V. استكشاف باطن الأرض باستخدام الموجات الزلزالية :
597	..... أ. انتقال الموجات الزلزالية في الأرض
599	..... ب. اكتشاف التركيب الداخلي للأرض :
599	..... 1. القشرة
600	..... 2. الوشاح
601	..... 3. اللب
602	..... 4. اللب الداخلي
602	..... ج. الطبقات المختلفة الخصائص الفيزيائية في الوشاح
603	..... VI. جاذبية الأرض وتوازن القشرة الأرضية
606	..... أ. قاعدة توازن القشرة الأرضية

الفصل السابع عشر

تكتونية الأنواع : نظرية شاملة

615	..... I. الأفكار الأولى عن الانجراف القاري
616	..... II. فرضية الانجراف القاري : فكرة قبل موعدها
617	..... III. دلائل الانجراف القاري
618	..... أ. التشابه بين التتابعات الصخرية وسلاسل الجبال

- 619 ب. دليل من المثالح.....
- 621 ج. أدلة من الحفريات.....
- 622 د. المغناطيسية القديمة والتجوال القطبي.....
- 625 IV. انتشار قيعان المحيطات :
- 627 أ. الانعكاسات المغناطيسية والانجراف القاري
- 628 ب. الحفر البحري العميق : إثبات لفرضية انتشار قيعان المحيطات.....
- 630 V. نظرية تكتونية الألواح :
- 633 أ. حدود الألواح :
- 633 1. الحدود المتباعدة
- 638 2. الحدود المتقاربة.....
- 644 3. الحدود الناقلة.....
- 645 ب. حركة الألواح :
- 645 1. الحركة النسبية للألواح
- 646 2. الحركات المطلقة للألواح.....
- 648 3. التغير في سرعة الألواح.....
- 649 4. الميكانيكية المحركة لتكتونية الألواح.....
- 651 IV. تكتونية الألواح والرواسب المعدنية.....

الفصل الثامن عشر

تكتونية القشرة القارية وسلاسل الجبال

- 657 ا. بعض التراكيب التكتونية الإقليمية.....
- 659 II. الأجزاء الداخلية المستقرة من القارات.....
- 663 III. أحزمة التجبل : بناء الجبال :
- 665 أ. تراكيب الجبال.....
- 667 ب. عمليات بناء الجبال :
- 667 1. بناء الجبال وأقواس الجزر : التجبل عند حدود الألواح المحيطية - المحيطية
- 669 2. بناء الجبال على امتداد الحواف القارية : التجبل عند حدود الألواح المحيطية - القارية

- 672 3. بناء الجبال نتيجة التصادم القاري : التجبل عند حدود الألواح القارية- القارية ...
- 673 4. بناء الجبال وتكتونية الألواح الصغيرة.....
- 675 IV. خسف القارات : ...
- 675 أ. الخسف ثلاثي الأذرع والنقاط الساخنة.....
- 676 ب المعالم الجيولوجية لوديان الخسف القارية.....
- 676 V. الحواف المستقرة للقارات.....
- 677 VI. الحركات الرأسية الإقليمية.....

الفصل التاسع عشر

مصادر الطاقة والثروة المعدنية

- 686 I. أنواع الموارد الجيولوجية : ...
- 686 أ. الموارد والاحتياجات.....
- 687 II. استخدام الطاقة.....
- 688 III. مصادر الطاقة :
- 688 أ- البترول : الزيت الخام والغاز الطبيعي :
- 688 1. تواجد الزيت الخام والغاز الطبيعي.....
- 689 2. استخراج الزيت
- 690 ب - الخام الثقيل ورمال الزيت (الرمال البترولية)
- 692 ج - طفل الزيت.....
- 692 د- الفحم : ..
- 692 1- أنواع الفحم.....
- 693 2- تواجد الفحم
- 693 3- التأثيرات البيئية.....
- 694 هـ- اليورانيوم
- 695 IV. المصادر البديلة للطاقة.....
- 696 V. الرواسب المعدنية والخامات (الركازات).....
- 698 أ - أصل الرواسب المعدنية :

698	1- الرواسب المعدنية الصحارية.....
699	2- الرواسب المعدنية الحرمائية.....
701	3- الرواسب المعدنية المتحولة.....
701	4- الرواسب المعدنية الرسوبية.....
703	5- رواسب الركيزة (المراقد).....
703	6- الرواسب المعدنية المتبقية (المتخلفة).....
705	ب - أقاليم التمعدن.....
705	VI. الموارد اللافلزية :.....
706	أ - مواد البناء.....
706	ب- المخصبات والمتبخرات.....
706	ج- المواد اللافلزية الأخرى.....
707	VII رواسب الحفاهات وتكتونية الألواح :.....
715	الملاحق.....
724	قائمة ببعض المراجع المختارة.....
727	الدليل.....
773	معجم المصطلحات.....

الفصل

1

مقدمة

I. أصل النظام الكوكبي :

أ - الفرضية السديمية

ب - نشأة الكواكب

II. تطور كوكب الأرض :

أ - تمايز الأرض

ب - أغلفة الأرض مختلفة التركيب الكيميائي

ج - أغلفة الأرض مختلفة الخصائص الفيزيائية

د - نشأة القارات والمحيطات والغلاف الجوي

III. ديناميكية عمل كوكب الأرض : الأرض دائبة الحركة :

أ - نظرية الكوارث ومبدأ التوتيرة الواحدة

ب - تكتونية الألواح : نظرية شاملة لعلم الجيولوجيا :

1 - حركات الألواح

2 - حدود الألواح

IV. التفاعلات بين طبقات الأرض الداخلية والخارجية

حفر الآبار العميقة أو تسجيل الموجات الصادرة عن اهتزازات الزلازل والبراكين ، مثل الطبيب الذى يعتمد على الأصوات التى تصل إليه عبر سحاحة الكشف لتعرف ما يدور داخل أجسامنا . ويعمل الجيولوجيون أيضا على التنبؤ بمواقع حقول البترول الجديدة وتواجدها الرواسب المعدنية والخامات وكذلك المياه الجوفية فى باطن الأرض . كما يقوم الجيولوجيون باستخدام الطرق العلمية الحديثة فى دراسة البيئة التى نعيش فيها ، والعوامل المختلفة التى تؤثر فيها .

وتنقسم الجيولوجيا إلى قسمين رئيسيين لكل منهما أهدافه ، مع ارتباط هذه الأهداف ببعضها البعض ، وهما الجيولوجيا الفيزيائية والجيولوجيا التاريخية . أما الجيولوجيا الفيزيائية **physical geology** فتهتم بدراسة : (1) العمليات التى تعمل على سطح الأرض أو تحته و(2) المواد التى تشملها وتؤثر فيها تلك العمليات . ومن العمليات الجيولوجية النشاط البركانى وأسبابه والزلازل والانحسارات الأرضية والفيضانات . ومن المواد المهمة التى يدرسها هذا العلم التربة والرمال والصخور والهواء وماء البحار .

أما الجيولوجيا التاريخية **historical geology** فتهدف إلى تأريخ وترتيب الأحداث الجيولوجية سواء

الأرض هى المكان الوحيد فى الكون المعروف - حتى الآن - الذى يضم أكثر من مليون صورة من صور الحياة بما فيها الإنسان ، كما أنه لم يُكتشف حتى الآن كوكب آخر له الاتزان الدقيق نفسه بين الظروف الضرورية للمحافظة على الحياة . والجيولوجيا (علم الأرض) **Geology** هو العلم الذى يدرس نشأة كوكب الأرض وطريقة تطوره وميكانيكية عمله وطرق المحافظة عليه . وقد اشتق مصطلح الجيولوجيا من اللفظ اليونانى **geo** بمعنى أرض ، و **logia** بمعنى دراسة أو علم . ويعرف العلماء المختصون بدراسة الأرض باسم "الجيولوجيون" **geologists** .

ويعمل الجيولوجيون بكل جهد لمحاولة فهم العمليات التى تدور على الأرض وأيضا فهم تاريخها الطويل المعقد ، بالبحث فى مختلف المواقع من القمم المغطاة بالثلوج حتى أعماق المحيطات مروراً بالبراكين النشطة . ويولى الجيولوجيون اهتماما خاصا لمكونات الأرض التى تتأثر بنشاط الإنسان كالأنهار ، وكذلك العمليات التى تسبب الكوارث الطبيعية مثل الثورات البركانية والزلازل . ويقوم الجيولوجيون بدراسة المعالم الجيولوجية الظاهرة مباشرة ، كما يعتمدون على الملاحظات غير المباشرة فى فحص الأماكن التى لا يستطيعون الوصول إليها من خلال

صلبة . فحبيبات الرمل غير المتماسكة الموجودة على شواطئ مدينة الإسكندرية بمصر مثلا ليست صخرًا ، حيث أن حبيباتها غير متماسكة وغير متداخلة مع بعضها بعضًا ، كما إن أى مادة حية كالأشجار مثلا لا تعتبر صخورًا أيضًا ، على الرغم من كونها مادة صلبة ، بينما يعتبر الفحم من الصخور ؛ نظرًا لأنه يتكون من مكونات نباتية كالأوراق والسيقان وغيرها ، مينة ومنضغطة ومتماسكة .

١ - أصل النظام الكوكبي

يعود البحث في أصل الكون عموماً وكوكب الأرض خصوصاً إلى الأساطير القديمة المدونة . ويعتمد التفسير العلمى المقبول اليوم لأصل الكون على نظرية الداوية الكبرى (الانفجار العظيم) Big Bang Theory ، والتي تنص على أن الكون بدأ منذ حوالي 10 إلى 15 بليون سنة من انفجار كوني هائل ، حيث كانت كل المادة والطاقة منضغطة في نقطة واحدة كثيفة قبل لحظة الانفجار . وبالرغم من أننا نعرف القليل عما حدث في جزء من الثانية التي بدأ فيها الانفجار ، فقد حاول الفلكيون فهم ما حدث للكون خلال بلايين السنين التالية . ولكن بصورة عامة ، فقد بدأ الكون ومازال يتمدد بصفة مستمرة ليكون المجرات galaxies والنجوم stars . ويركز الجيولوجيون دراساتهم على الأربعة ونصف بليون سنة الأخيرة من هذا المدى الزمني الواسع ، حيث تكون نظامنا الشمسى من نجم الشمس والكواكب الثانية التي تدور حوله . ويؤدى فهمنا لكيفية تكون النظام الشمسى بالتالى إلى فهم أصل الأرض وطريقة تكونها .

المتصلة بفيزياء الأرض أو الحياة ، والتي حدثت في الماضي . وتبحث الجيولوجيا التاريخية في الإجابة عن أسئلة تتعلق بتاريخ الأرض مثل : متى تكون كوكب الأرض عموماً ، ومتى تكونت المحيطات ، ومتى نشأت الحياة ، ومتى ظهرت الديناصورات لأول مرة ، ومتى تكونت جبال البحر الأحمر في الصحراء الشرقية بمصر ، ومتى وأين ظهرت الأشجار لأول مرة ؟ . ومن أهم الإسهامات التي قدمها علم الجيولوجيا التاريخية للمعرفة الإنسانية مقياس الزمن الجيولوجى **geologic time scale** ، حيث تم وضع تقويم زمنى لعمر الأرض الذى يبلغ 4600 مليون سنة ، كما وضع على هذا التقويم الأحداث الجيولوجية حسب ترتيبها الزمنى الصحيح (شكل 1-1) .

وتعتبر الجيولوجيا الفيزيائية - وهى موضوع هذا الكتاب - نقطة البداية في دراسة الأرض وهى البيشة التى تحيط بنا ، لنكون قادرين على التنبؤ بالتغيرات التى يمكن أن تحدث فيها مستقبلاً ، مما يحتم ضرورة فهم ميكانيكية عمل الأرض ودراسة المواد التى تكونها خاصة المعادن والصخور والعمليات التى تؤثر فيها .

ولفظ صخر مصطلح مهم ، سيستخدم كثيراً في هذا الكتاب ، ولذلك نعين تعريفه بدقة وتفصيل . فالصخر **rock** كل مادة صلبة متماسكة غير حية تكونت طبيعياً من معدن واحد أو من خليط من عدة معادن ، وتكون جزءاً من كوكب . ويجب ملاحظة أن التعريف يشير إلى تجمع متماسك بمعنى أن كل حبيبات الصخر يجب أن تكون متلاحة ومتداخلة مع بعضها بعضاً لتكون كتلة

دهر Eon	حقب Era	عصر Period	حين Epoch	العمر م. س.	تطور النباتات والحيوانات
الحياة الظاهرة Phanerozoic	الحياة الحديثة Cenozoic	الرابع	المولوسين	0.01	ظهور الإنسان
			البليستوسين	1.8	
		الثالث	البليوسين	5.3	عصر الثدييات
			الميوسين	24	
			الأوليغوسين	37	انقراض الديناصورات والعديد من الأنواع الأخرى
			الأيوسين	58	
			الباليوسين	65	ظهور النباتات الزهرية
	الحياة الوسطى Mesozoic	الطباشيري		135	ظهور الطيور
		الجوراسي	عصر الزواحف	180	
		الترياسي		225	سيادة الديناصورات
	الحياة القديمة Paleozoic	البرمي		265	بداية الزواحف
		الكربوني	عصر البرمائيات	345	مستنقعات الفحم الضخمة ، انتشار البرمائيات
		الديفوني		400	بداية الحشرات - سيادة الأسماك
		السليلوري	عصر الأسماك	430	بداية النباتات القارية
		الأوردوفيشي		500	بداية الأسماك
		الكمبري	عصر اللاقاريات	570	سيادة ثلاثية الفصوص
					بداية الكائنات الميكلمية
				570	بداية الكائنات وحيدة الخلايا
				2500	بداية الكائنات وحيدة الخلايا ، أقدم الصخور
				3800	نشأة الأرض
				4600	
البروتروزوي Proterozoic	Precambrian				
الأركي Archaean	يطلق عليه ما قبل الكمبري ويشمل 87% من عمر الأرض				
الهاديان Hadean					

شكل (1.1): مقياس الزمن الجيولوجي geologic time scale ، وتمثل الأعداد العمر مقدرا بملايين السنين قبل الآن (Ma). يشمل دهر الحياة الظاهرة (زمن الحياة الظاهرة) حقبة الحياة القديمة ، وحقبة الحياة الوسطى وحقبة الحياة الحديثة . ويشمل زمن ما قبل الكمبري الأقدم دهر البروتروزوي (زمن الحياة البدائية) ، ودهر الأركي (زمن الحياة القديمة) ، ودهر الهاديان (ما قبل الزمن الجيولوجي) الذي لا يوجد سجل صخري له .

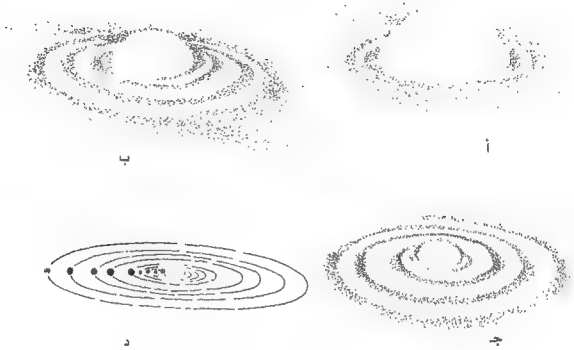
الشمسية ليس فراغا كما كان يظن سابقا. ولقد سجل

الفلكيون عديداً من السحب المائلة لتلك التي اقترحها الفيلسوف كانت، وسميت تلك السحب بالسُّدم nebulae (جمع سديم). كما اكتشف الفلكيون أن هذه السحب تتكون من غازات معظمها هيدروجين (H) وهيليوم (He)، بالإضافة لرماد دقيق الحجم يشبه كيميائياً المواد التي نجدها على الأرض.

ثم بدأت المرحلة الأولى في نمو هذا الكوكب منذ حوالي 4.6 بليون سنة مضت حين تكونت سحابة كروية دوارة من الغازات والثلج والرماد (شكل 2.1 أ). وقد أدت الجاذبية التي أثرت على المواد الموجودة داخل هذه السحابة إلى تقارب الجسيمات من بعضها البعض، مما أدى إلى انكماش المادة إلى الداخل وقلّة حجم السحابة، وبالتالي زيادة سرعة دورانها (كما يحدث للمتمزج على الجليد حيث تزداد سرعة دورانه حول نفسه عندما يضم ذراعيه للداخل)، ثم أخذت السحابة شكلاً مسطحاً كالقرص (شكل 2.1 ب). وقد أدى تحرك المادة نحو المركز وزيادة كثافتها إلى تكون الشمس الابتدائية protosun، وهي المادة التي تكونت منها الشمس الحالية (شكل 2.1 ج)، كما أدى زيادة حجم الكتلة المركزية للشمس الابتدائية التي أصبحت كثيفة إلى ارتفاع حرارتها الداخلية إلى ملايين الدرجات المئوية، ثم بدأت عملية الاندماج النووي nuclear fusion. وفي عملية الاندماج النووي (تندمج) ذرات الهيدروجين تحت الضغط الشديد والحرارة المرتفعة لتكوّن غاز الهيليوم مع تحول قدر

إن الهدف الأساسي لكل العلوم هو التوصل إلى كيفية تكوّن الكون بدقة. ولتفسير الظواهر المختلفة يقترح العلماء فرضيات hypotheses يعتمدون فيها على التجارب والملاحظات، ثم يقدمونها إلى المجتمع العلمي لتخضع لمزيد من الدراسات والاختبارات. وإذا صمدت الفرضية أمام الاختبارات العلمية فإنها ترقى إلى مستوى النظرية theory. ولا تصبح النظرية مسلماً بها إلى الأبد، على الرغم من أنها قد تكون اكتسبت بعض القوة بمرور الوقت، حيث إن جوهر العلم يقوم على عدم استثناء أى نظرية من المراجعة المستمرة. وإذا ظهر دليل أو برهان جديد يوضح خطأ النظرية، قام العلماء بتعديلها أو حتى إلغاؤها من الأساس. وكلما صمدت النظرية أمام التحديات العلمية زادت مصداقيتها. وبالتالي فإن الفرضية هي خطوة بدائية تسبق النظرية التي تخضع لكثير من النقد والتحقيق.

وسنناقش أصل كوكب الأرض في ضوء الفرضية السديمية. حيث اقترح الفيلسوف الألماني إيمانويل كانت Immanuel Kant في عام 1755 م أن أصل المجموعة الشمسية يرجع إلى التصادم الحادث بين مكونات مادة سحابة دوارة من الغازات والرماد الدقيق. وقد أدت الاكتشافات التي توصل إليها العلماء في العقود الأخيرة من القرن العشرين إلى عودة الفلكيين إلى الفكرة القديمة المسماة بالفرضية السديمية nebular hypothesis، حيث أظهرت التليسكوبات الحديثة أن الفضاء خارج المجموعة



شكل (2.1): فرضية أصل النظام الشمسي : الفرضية السديمية Nebular hypothesis .

(أ) تتكون في البداية سحابة كروية ضخمة دوارة من الثلج والغاز وبقيّة أشكال الحطام .

(ب) تنكمش هذه الكتلة سريعة الدوران لتكون قرصاً مفلطحاً ، له مركز كروي عالي الكثافة ، والذي تنشأ منه الشمس الابتدائية protosun .

(ج) تنشأ الكواكب الابتدائية وتنمو نتيجة اصطدام الكتل الصغيرة أو الجسيمات الكوكبية Planetesimals والتحامها بعضها ببعض .

(د) تدور الكواكب حول الشمس للنهاية ، وتكون الأرض هي الكوكب الثالث الدوار حول الشمس .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

ضئيل من الكتلة إلى طاقة أثناء العملية . ونحن نشعر فوق سطح الأرض بذلك التحول على هيئة إشعاع شمسي .

ب - نشأة الكواكب

إلى قرص أجزائه الداخلية أكثر سخونة وكثافة عن الأجزاء الخارجية الأقل كثافة وحرارة نتيجة تجمع معظم المادة فيه . وعندما يبدأ هذا القرص في التبريد يتكثف عديد من الغازات ، أي تتحول إلى الحالة السائلة أو الصلبة ، ويتصلب الماء ويتحول إلى جليد عند التبريد إلى درجة أقل من درجة التجمد . وقد أدت الجاذبية التناقلية إلى تصادم مكونات الغبار والمواد المتكثفة ببعضها بعضاً ، ثم تجمعت وتلاحمت على هيئة

على لرغم من تركيز معظم مادة السديم الأصلي في الشمس الابتدائية ، فإن هناك قرصاً من الغاز والغبار يسمى بالسديم الشمسي solar nebula بقى مغلفاً لها . وقد أصبح السديم الشمسي ساخناً نتيجة تحوله

تعنى الأرض). وتكون هذه الكواكب صغيرة وصخرية لأنها تكونت تحت درجة حرارة عالية، إلى الحد الذى لا يمكنها أن تحتفظ بكميات كبيرة من المواد المتطايرة (وهى المواد التى تتحول إلى غازات وتهرب عند درجات حرارة منخفضة نسبياً). وقد تسبب الإشعاع والمواد المتدفقة من الشمس في هروب معظم الهيدروجين والهيليوم والماء والغازات الخفيفة الأخرى والسوائل تاركة الفلزات الثقيلة مثل الحديد وبقاى المواد الثقيلة المكونة للصخور حول الكواكب الداخلية. وقد نشأت هذه الكواكب الداخلية منذ نحو 4.5 بليون سنة كتكل صخرية كثيفة.

وحسب التسلسل السابق، فإن معظم المواد الطيارة قد اندفعت من منطقة الكواكب الأرضية إلى الأجزاء الخارجية الباردة من المجموعة الشمسية، حيث تكونت الكواكب الخارجية outer planets العملاقة وهى: المشترى Jupiter وزحل Saturn وأورانوس Uranus ونبتون Neptune والأقمار المصاحبة لها. وقد كانت هذه الكواكب كبيرة الحجم، كما كانت جاذبيتها قوية بحيث استطاعت الاحتفاظ بالمكونات السديمية الأخف. لذلك، وعلى الرغم من أن الكواكب الخارجية لها لب صخرى مثل الشمس، إلا أنها تتكون في معظمها من الهيدروجين والهيليوم وغيرها من المكونات الخفيفة التى ورثتها من السديم الأصلى. هذا، وقد ناقش الاتحاد الدولى للفلك (International Astronomical Union) في اجتماعه في 24 أغسطس 2006م إخراج بلوتو من زمرة

جسيمات صغيرة مكتنزة تعرف بالجسيمات الكوكبية planetesimals. وحين تصادم هذه الجسيمات الكوكبية وتلتحم بعضها ببعض، فقد تتكون أجسام أكبر حجماً تقرب من حجم القمر (شكل 2.1 ج). وفي المرحلة النهائية من هذا التصادم والاندماج المفاجئ العنيف، تجرف الأجسام الكبيرة الأجسام الأخرى نتيجة للجاذبية التناقلية الكبيرة لها، لتتكون الكواكب الثانية التى تسير في مداراتها الحالية، وهى الكواكب المكونة لمجموعتنا الشمسية (شكل 2.1 د). وتدل الحسابات النظرية أن معظم هذا النشاط قد حدث في وقت قصير يقدر بأقل من مائة مليون سنة بدأت قبل نحو 4.5 بليون سنة. ويعتمد حساب ذلك التاريخ على عمر النيازك التى تصطدم أحياناً بالأرض، والتي يعتقد أنها جزء من بقايا المكونات التى تكونت في ذلك الزمن البعيد.

وتدور بعض الكواكب بعد تكونها في مدارات قريبة من الشمس، بينما يدور البعض الآخر في مدارات بعيدة عن الشمس. ولذلك تختلف طريقة تطور الكواكب الأقرب من الشمس عن تلك الموجودة في مدارات أبعد عنها. وعلى عكس الكواكب الخارجية، فإن الكواكب الداخلية inner planets الأربعة الأقرب إلى الشمس وهى عطارد Mercury والزهرة Venus والأرض Earth والمريخ Mars تكون شبيهة بكوكب الأرض، ولذلك تعرف أيضاً بالكواكب الأرضية terrestrial planets (كلمة terra اللاتينية

أدت هذه الاصطدامات إلى تحول معظم طاقة الحركة إلى حرارة، وهى صورة أخرى من صور الطاقة. ويعتقد أن اصطدام جسم في حجم كوكب المريخ مع الأرض بسرعة كبيرة قد أدى إلى خروج طاقة هائلة تكفى لدفع كمية كبيرة من الحطام في الفضاء، كما انطلقت كمية من الحرارة تكفى لأن ينصهر معظم ما تبقى من مادة ليكون كوكب الأرض الابتدائى .

ويعتقد العلماء الآن أن هذا التغير العنيف قد حدث فعلاً ولم يؤد إلى الانصهار التام فقط، بل تسبب في تكون القمر moon، حيث أدى الاصطدام الهائل إلى تكون وابل من الحطام أتى من الأرض ومن الجسم المرتطم في الفضاء ليتكون القمر من هذا الحطام بعد إعادة تشكيله كجسم منصهر كبير. كما أدى هذا الارتطام الكبير إلى انحراف محور دوران الأرض بحوالى 23° عن الوضع الرأسى بالنسبة لمستوى المدار إلى المحور المائل الحالى، بالإضافة إلى زيادة سرعة دوران الأرض. وقد ثبت من دراسة الصخور التى جمعها مركبة الفضاء أبولو من القمر أن عمر صخور القمر يقدر بحوالى 4.44 بليون سنة، وهو ما يقرب من زمن الارتطام العنيف. وإذا كانت تلك الفرضية صحيحة، فإن عمر الأرض يتراوح بين العمر المقدّر للنيازك وهو 4.56 بليون سنة وعمر صخور القمر.

وبالإضافة إلى ذلك، فلا بد من وجود مصدر يضيف للأرض حرارة باستمرار؛ حيث يوجد ضمن العناصر الكيميائية الكثيرة في الأرض عدد من العناصر التى تتميز بالقدرة على الإشعاع الطيعى، بمعنى أنها

كواكب المجموعة الشمسية، وذلك لصغر حجمه الذى يخرجه عن التعريف الجديد للكوكب، وهو أنه "أى جرم سماوى يدور حول الشمس وله كتلة تكفى لأن يصبح دائرى الشكل، وأفرغ المنطقة حول مساره". وبسبب القوة المحدودة لببلوتو Pluto فلا يستطيع التغلب على نبتون القريب منه والذى يقطع مداره، ويفرغه من أجرام عديدة في حجم بلوتو، إلا أن هذا الأمر لم يقرر بشكل نهائى حتى الآن. وتعرف هذه الكواكب الخارجية بالكواكب الجويترية Jovian planets وهو اسم مستمد من Jove وهو اسم آخر لجوبيتر Jupiter كبير آلهة الرومان.

II - تطور كوكب الأرض

كيف تطورت الأرض من كتلة صخرية إلى كوكب حى به قارات ومحيطات وغلاف جوى؟ وتكمن الإجابة على هذا السؤال في عملية التمايز differentiation - وهى تحول الأرض من كتلة تتكون من مواد مختلطة بعضها ببعض بطريقة عشوائية إلى جسم مقسم من الداخل إلى أغلفة متحدة المركز تختلف عن بعضها فيزيائياً وكيميائياً. وقد حدث التمايز مبكراً في تاريخ الأرض، حيث كان كوكباً ساخناً إلى الحد الذى أدى إلى صهر مكوناته. وقد اصطدمت الأرض عند بداية تكونها بجسيمات كوكبية وأجسام أخرى أكبر. ومن المعروف أن الجسم المتحرك يحمل كمية كبيرة من طاقة الحركة (علينا أن نتذكر كيف تودى طاقة الحركة إلى تحطم سيارة عند وقوع حادثه ما). وقد

ب - أغلفة الأرض مختلفة التركيب الكيميائي تنقسم الأرض إلى ثلاثة أغلفة مختلفة في التركيب الكيميائي (شكل 3.1). ويسمى الغلاف الداخلى جهة المركز باللب **core** وهو أكثر الأغلفة الثلاثة كثافة. واللب عبارة عن كتلة تتكون أساسا من فلز الحديد، بالإضافة إلى كميات قليلة من النيكل وعناصر أخرى.

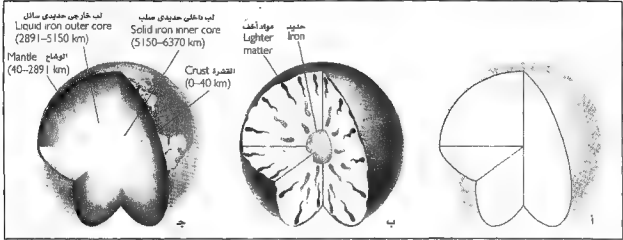
ويطلق على الغلاف السميك المحيط باللب والمكون من مواد صخرية كثيفة الوشاح **mantle**، وهو أقل كثافة من اللب، ولكن أكبر كثافة من الغلاف الذى يليه للخارج. ويوجد فوق الوشاح الغلاف الأثقل سمكا وهو القشرة **crust**، والتى تتكون من مادة صخرية أقل كثافة من صخور الوشاح الموجود أسفلها. ويوضح شكل (3.1) أن اللب والوشاح سمكها ثابت تقريباً. أما القشرة فتكون غير منتظمة السمك، حيث يبلغ متوسط سمك القشرة المحيطية **oceanic crust** حوالى 8 كم بينما يبلغ متوسط سمك القشرة القارية **continental crust** نحو 45 كم، ويتراوح بين 30 و 70 كم.

وعلى الرغم من أننا لا نستطيع رؤية أو أخذ عينات من اللب أو الوشاح، إلا أنه يمكننا عن طريق قياس السرعات التى تسير بها الموجات الزلزالية عبر الأرض أن نعرف أن كوكب الأرض الصلب ليس له تركيب متجانس، وأن الأرض تتكون من عدة أغلفة ذات كثافات مختلفة. ويمكن تحديد تركيب الأغلفة المختلفة للأرض من معرفة كثافتها. وتوضح العينات التى

تتحول تلقائياً إلى عناصر أخرى وتطلق كميات من الجسيمات والطاقة الحرارية. ومن أمثلة ذلك عناصر اليورانيوم والثوريوم اللذان يتحولان إلى رصاص، وتطلق كميات ضئيلة من الحرارة فى كل مرة يحدث فيها هذا التحول الإشعاعى. ولذلك، فقد استمر النشاط الإشعاعى فى رفع درجة حرارة الأرض حتى فى الأوقات التى قلت فيها تصادمات النيازك.

أ - تمايز الأرض

بدأت الأرض فى الانصهار نتيجة للعوامل السابقة، كما بدأت عملية التمايز أيضاً (شكل 3.1)، بأن صعدت المواد المنصهرة الأخف وزناً ناحية السطح، وهى مواد غنية بالسيليكون والألومنيوم والصوديوم والبوتاسيوم. ولا تزال الصخور الموجودة عند سطح الأرض غنية فى تلك العناصر، بينما غاصت المواد المنصهرة ذات الكثافة الأعلى، مثل الحديد المنصهر إلى مركز الأرض، وهربت المواد الطيارة على هيئة غازات عبر البراكين. وكونت تلك الغازات الهاربة الغلاف الجوى لكوكب الأرض، والتى تشتمل أساساً على بخار الماء وثنائى أكسيد الكربون والميثان وربما الأمونيا. كما نشأ ماء المحيطات من المواد الطيارة أيضاً. وأدت عملية التمايز إلى تغير الأرض من كوكب متجانس أصلاً إلى كوكب مكوّن من أغلفة مختلفة فى التركيب والخواص الفيزيائية.



شكل (3.1): نشأة أغلفة الأرض .

(1) تكونت الأرض في البداية كجسم متجانس ، دون قارات أو محيطات.

(ب) بدأت عملية التمايز differentiation ، غاص الحديد إلى مركز الأرض السائل ، بينما طفت المواد الأقل كثافة إلى السطح لتكون القشرة

(ج) تمايز كوكب الأرض في النهاية إلى ثلاثة أغلفة ، هي: لب core عالى الكثافة مكون من الحديد وقشرة crust تتكون من صخور أقل

كثافة ، ووشاح mantle بينهما .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

أخذت من القشرة أنها مختلفة في التركيب عن الوشاح . ج - أغلفة الأرض المختلفة الخصائص الفيزيائية

أى أن التركيب الكلى للقشرة ، وكذلك الكثافة تختلف على تركيبة الكوكب الأرض إلى لب ووشاح وقشرة بناءً على تلك التي قدرت للوشاح .

كما لوحظ أن تحديد تركيب لب الأرض أكثر

صعوبة ، وذلك يرجع إلى أن درجات الحرارة تكون

عالية ، كما يكون الضغط مرتفعاً إلى حد أنها تغير من

الخصائص التي نعرفها للمواد . وتأتى بعض الأدلة

المهمة المتعلقة بتركيب لب الأرض من التيازك الحديدية،

حيث يعتقد أن تلك التيازك وهى فتات من لب كوكب

أرضى صغير تفتت بسبب تصادم ضخم حدث مبكراً

في تاريخ النظام الشمسى ، وأن هذا الكوكب المفتت

كان مقسماً إلى أغلفة ذات تركيب مشابه لتلك الموجودة

في الأرض وباقي الكواكب الأرضية.

واللب.

ويشتق اسمه من الكلمة اليونانية meso بمعنى أوسط و sphere بمعنى غلاف . والغلاف الأوسط هو منطقة صلبة ، حيث تكون الصخور فيه معرضة لضغوط عالية ، وتتميز بشدة أى بصلابة عالية على الرغم من درجة حرارتها العالية جداً .

الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) : ويوجد في الجزء العلوى من الوشاح (شكل 4.1) ، ويمتد من عمق 350 كم إلى ما بين 100 أو 200 كم أسفل سطح الأرض ، ويشترك اسم الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) asthenosphere من الكلمة اليونانية asthenos بمعنى ضعيف و sphere بمعنى غلاف . ويتميز بأن شدة الصخور تكون فيه قليلة نتيجة التوازن بين درجة الحرارة والضغط ، كما تكون الصخور ضعيفة وسهلة التشوه ، مثل الزيد أو القطران الدافئ بدل أن تكون قوية مثل تلك الموجودة في الغلاف الأوسط . ويلاحظ أن تركيب الغلافين الأوسط واللدن واحد ، حيث يتكونان من المواد نفسها ، بينما يختلفان في الشدة . فتكون الصخور في الغلاف اللدن لدنة ، بينما تكون في الغلاف الأوسط صلبة .

الغلاف الصخري (الليثوسفير) : ويوجد فوق الغلاف اللدن ، ويشمل كل المنطقة الخارجية الصلبة للأرض والتي تتكون من الجزء العلوى للوشاح وكل القشرة الأرضية (شكل 4.1) . ويشترك اسم الغلاف الصخري (الليثوسفير) lithosphere من الكلمة اليونانية lithos بمعنى حجر أو صخر و sphere

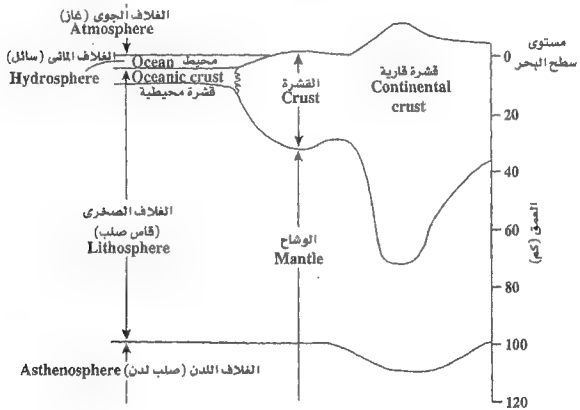
اللب الداخلى والخارجى : ينقسم لب الأرض إلى قسمين أحدهما داخلى والآخر خارجى (شكل 3.1) . أما اللب الداخلى inner core فتكون الضغوط فيه كبيرة لدرجة أن معدن الحديد المكوّن له يكون في حالة صلبة ، على الرغم من درجة حرارته المرتفعة . ولذا فإن مركز الأرض يكون صلباً ، ويرجع السبب في ذلك إلى أن الحرارة التى تبدأ عندها المادة في الانصهار تزداد مع زيادة الضغط . أما اللب الخارجى outer core فيحيط باللب الداخلى ، وفيه يتوازن الضغط مع درجة الحرارة مما يؤدي إلى أن يكون الحديد المكوّن له في الحالة السائلة . ويتضح مما سبق أن اللبين الداخلى والخارجى يكونان متفقين في التركيب ويختلفان في الحالة الفيزيائية ، حيث يكون اللب الداخلى في الحالة الصلبة بينما يكون اللب الخارجى في الحالة السائلة .

الغلاف الأوسط (الميزوسفير) : تتحكم درجة الحرارة والضغط في شدة الجسم الصلب . فعند تسخين جسم صلب فإنه يفقد شدته ، بينما تؤدي زيادة الضغط لزيادة الشدة (الصلابة) . ويقسم الوشاح والقشرة بناءً على درجة الحرارة والضغط إلى ثلاث مناطق مختلفة الشدة ، هي من الداخل إلى الخارج : الغلاف الأوسط (الميزوسفير) والغلاف اللدن (الأسثينوسفير) والغلاف الصخري (الليثوسفير) .

ويقسم الغلاف الأوسط (الميزوسفير) mesosphere في الجزء الداخلى من الوشاح المجاور لللب الأرض بين عمق 2891 كم ونحو 350 كم ،

بمعنى غلاف . وتكون الصخور فيه صلبة ، كما تكون أكثر برودة وقوة وصلابة من تلك الموجودة في الغلاف اللدن . وعلى الرغم من الاختلاف في التركيب بين كل من القشرة والوشاح ، إلا أن شدة الصخر وليس تركيبه هي التي تميز الغلاف الصخري عن الغلاف اللدن .

ويوضح هذا الاختلاف في طبيعة أغلفة الأرض ، أن الغلاف الصخري يعمل كغلاف صلب قابل للكسر بينما ينساب الغلاف اللدن الموجود أسفله كماء لدنة . فالاختلاف في الشدة بين صخر في الغلاف الصخري وصخر آخر في الغلاف اللدن هو عاملا الضغط ودرجة الحرارة المؤثران على كل منهما . وتفقد كل أنواع الصخور شدتها وتصبح قابلة للتشوه عند عمق



شكل (4.1): تباين الطبقات العليا من الأرض:

- (أ) بناء على تركيبها ، حيث تفصل القشرة منخفضة الكثافة عن الوشاح العلوي الذي يسفله مباشرة ويكون أعلى كثافة ، أو
(ب) بناء على شدتها ، حيث يتراكم الغلاف الصخري الصلب فوق طبقة الأسثينوسفير اللدنة .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

100 كم عند قاعدة الغلاف الصخري تحت المحيطات ،
أو عند عمق نحو 200 كم عند قاعدة الغلاف
الصخري تحت القارات .

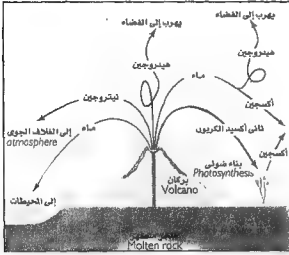
د - نشأة القارات والمحيطات والغلاف الجوى

بصرف النظر عن الحرارة التى نشأت عن
الاصطدامات التى حدثت أثناء المرحلة الأولى لتكوّن
الأرض ، فقد كان هناك مصدران دائمان للحرارة عبر
تاريخ الأرض ، أحدهما داخل نتج معظمه من النشاط
الإشعاعى والآخر خارجى نتج عن الطاقة الشمسية .
وكما أن آلة الاحتراق الموجودة فى السيارة مثلاً تحول
الطاقة الحرارية الناتجة عن احتراق الوقود إلى حركة
ميكانيكية ، فإن الحرارة الداخلية تسبب انصهار
الصخور والنشاط البركانى ، كما تعطى الطاقة اللازمة
لبناء وحركة القارات وحركة الجبال على امتداد صدوع
الدرس thrust faults لأعلى . أما الحرارة الخارجية
فإنها تكون مسئولة عن المناخ وحالة الطقس ، والتجوية
وسقوط الأمطار وحركة الرياح التى تعمل على تعرية
الجبال وتشكيل صفحة الأرض .

المحيطات والغلاف الجوى: يعتقد معظم
الجيولوجيين أن أصل مياه المحيطات والغلاف الجوى
يرجع إلى الأرض نفسها ، حيث تكوّنت المياه
والغازات أثناء عمليات التسخين والتهايز ، بينما يعتقد
قلة أخرى من الجيولوجيين أن أصل مياه المحيطات
والغلاف الجوى يرجع لسبب خارجى ، أى إلى
المذنبات comets . فعندما قُذفت الأرض فى المرحلة
المبكرة لتكونها بعدد لا يحصى من المذنبات المحملة
بالمياه والغازات ، تكونت المحيطات الأولية والغلاف
الجوى .

ويعتقد الجيولوجيون الذين يُجمعون أصل
المحيطات والغلاف الجوى إلى الأرض نفسها أن الماء
موجود أصلاً فى بعض المعادن كأكسجين وهيدروجين
مرتبطان كيميائياً فى تلك المعادن ، كما يوجد النيتروجين
أيضاً مرتبطاً كيميائياً فى معادن أخرى . وأثناء تسخين
الأرض وانصهار مكوناتها جزئياً انطلق بخار الماء

القارات: بدأ نمو القارات بعد مرحلة تمايز أغلفة
الأرض مباشرة ، واستمر ذلك النمو خلال الزمن
الجيولوجى . وعموماً ، فإن معلوماتنا عن السبب فى
تكوّن القارات مازالت فى بدايتها . ويعتقد كثير من
العلماء أن الصهارة تصاعدت من باطن الأرض
المنصهر إلى السطح لتبرد وتصلب وتكوّن قشرة من
الصخور . وقد انصهرت تلك القشرة الابتدائية



شكل (5.1): يضيف للنشاط البركاني كميات هائلة من الماء وثاني أكسيد الكربون وغيرها من الغازات إلى الغلاف الجوي للأرض، كما يضيف أيضا كميات من المواد الصلبة للغارات. كما عملت عملية البناء الضوئي التي تقوم بها النباتات على إزالة ثاني أكسيد الكربون وإضافة الأكسجين إلى الغلاف الجوي الابتدائي للأرض، بينما هرب الهيدروجين من جو الأرض بسهولة نظرا لخفة وزنه.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

التي تحيط بالقارات وتمتد من خط الشاطئ في اتجاه البحر، وتكون مغمورة بهاء المحيط الضحل نسبيا. ويختلف عرض الرف القاري بدرجة كبيرة. فهو قد لا يتواجد مطلقا حول بعض القارات، بينما قد يمتد لمسافة قد تصل إلى 1500 كيلومتر حول قارات أخرى. ويكون عرض الرف القاري في المتوسط نحو 80 كيلومترا، وقد يصل إلى 130 مترا عمقا. ويكون انحدار الرف القاري لطيفا لدرجة أنه يبدو للناس كأنه سطح أفقي. وبلى الرف القاري المنحدر القاري

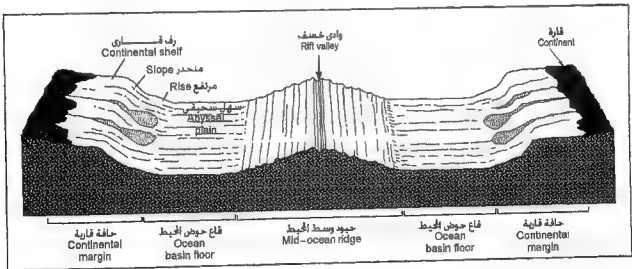
والغازات الأخرى لتحملها الصهارات إلى السطح وتنتقل أثناء النشاط البركاني. فربما كانت الغازات المنبعثة من البراكين منذ نحو 4 بليون سنة مكونة من المواد نفسها التي تقذفها البراكين اليوم مثل بخار الماء والهيدروجين وثاني أكسيد الكربون والنيتروجين والقليل من الغازات الأخرى (شكل 5.1). وهكذا، فإن الغلاف الجوي الأول للأرض كان مختلفا تماما عن الغلاف الجوي الحالي، والذي يتكون أساسا من النيتروجين والأكسجين. وربما تكونت كميات مناسبة من الأكسجين الحر بعد بدء الحياة نتيجة لعمليات البناء الضوئي photosynthesis التي قامت بها الطحالب، والتي تعتبر أحد أبسط أشكال الحياة وحيدة الخلية. وتستخدم الطحالب ثاني أكسيد الكربون والماء وطاقة أشعة الشمس لتكوّن المادة العضوية وينطلق الأكسجين الذي بدأ في التراكم في الغلاف الجوي ليصل تدريجيا إلى نسبته الحالية.

أحواض المحيطات: من الملامح المهمة لكوكب الأرض وجود القارات وأحواض المحيطات على سطحه. وتغطي المحيطات نحو 71% من سطح الأرض، ويبلغ متوسط العمق فيها نحو 3.7 كم، بينما تغطي اليابسة نحو 29% المتبقية من سطح الأرض. ويقسم قاع المحيط ابتداء من خط الشاطئ حتى أعماق نقطة في الحوض المحيطي إلى أربعة أقسام، وهي: الرف القاري والمنحدر القاري والمرتفع القاري والسهل السحيق (شكل 6.1). أما الرف القاري continental shelf فهو الحافة لطيفة الانحدار

تلك السهول براكين خامدة غالباً تعرف بالـ **continental slope** ، ويبلغ عرضه نحو 25 كم ، ويتميز بانحدار حاد مقارنة بالرف القارى. أما الارتفاع القارى **continental rise** والذى يمتد من المنحدر القارى فى اتجاه البحر حتى السهل السحيق . ويمتد الارتفاع القارى لمئات الكيلومترات حتى حوض المحيط العميق . ويكون الارتفاع القارى جزءاً محيزاً من قاع المحيط ، ويتكون من قشرة محيطية مغطاة بالرواسب الناتجة عن تعرية كتلة القارة المجاورة. ويشمل السهل السحيق **abyssal plain** المساحة الكبيرة المنبسطة من قاع المحيط ، والتي تمتد فى العرض من 200 حتى 2000 كم، ويتراوح عمقها بين 3 إلى 6 كم تحت سطح المحيط . ويتكون السهل السحيق من تراكم الرواسب التى تحركت أسفل المنحدرات من الرف القارى إلى قاع المحيط العميق. ويرتفع أحياناً من

تلك السهول براكين خامدة غالباً تعرف بالـ **continental slope** ، ويبلغ عرضه نحو 25 كم ، ويتميز بانحدار حاد مقارنة بالرف القارى. أما الارتفاع القارى **continental rise** والذى يمتد من المنحدر القارى فى اتجاه البحر حتى السهل السحيق . ويمتد الارتفاع القارى لمئات الكيلومترات حتى حوض المحيط العميق . ويكون الارتفاع القارى جزءاً محيزاً من قاع المحيط ، ويتكون من قشرة محيطية مغطاة بالرواسب الناتجة عن تعرية كتلة القارة المجاورة. ويشمل السهل السحيق **abyssal plain** المساحة الكبيرة المنبسطة من قاع المحيط ، والتي تمتد فى العرض من 200 حتى 2000 كم، ويتراوح عمقها بين 3 إلى 6 كم تحت سطح المحيط . ويتكون السهل السحيق من تراكم الرواسب التى تحركت أسفل المنحدرات من الرف القارى إلى قاع المحيط العميق. ويرتفع أحياناً من

ولا تنطبق خطوط الشواطئ الحالية بالضبط مع الحدود الفاصلة بين القشرة القارية والمحيطية ، نظراً لأن ماء المحيط يتدفق ليغضى جزءاً من القارة . كما أن الحافة الجيولوجية لحوض المحيط ليست هى خط الشاطئ ، بل هى المكان الذى يفصل بين القشرة المحيطية والقشرة القارية ، وتوجد هذه الحافة أسفل المنحدر القارى .



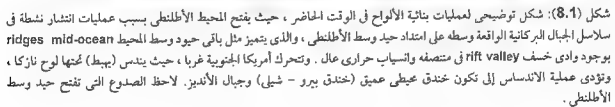
شكل (6.1): أقسام قاع المحيط الرئيسية ، حيث يظهر جزء من قاع المحيط الأطلنطي .
(After Strahler, A. and Strahler, A., 1999: *Introducing Physical Geography*, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).



شكل (7.1): خريطة طبوغرافية لقاع المحيط الأطلنطي (بعد إزالة الماء)، توضح حيد وسط الأطلنطي Mid-Atlantic Ridge، لاحظ أن جزيرة آيسلندا تقع على حيد وسط المحيط الأطلنطي، حيث تظهر واحدة من أكبر سلاسل الجبال في العالم كما توضح الخريطة الفرق في المعالي الطبوغرافية لقاع المحيط وتلك الموجودة فوق القارات.

(After Heezen, C. and Sharp, M., 1977: World ocean floor panorama in Decker, R. and Decker, B., 1997: Volcanoes, 4th edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ومن المعالم المميزة لقيعان المحيطات الجيود المحيطية
والخنادق المحيطية . أما الجيود المحيطية **oceanic**
ridges والتي تعرف أيضاً بالجيود وسط المحيطية
mid-ocean-ridges أو المرتفعات المحيطية
oceanic rises ، فهي سلاسل جبلية صخرية تكون
مستمرة على قيعان المحيطات ، حيث يبلغ ارتفاعها
حوالى 0.6 كم أو أكثر فوق قاع المحيط (شكل 7.1) .
وتتفرع الجيود المحيطية في نمط معقد في الأحواض
المحيطية .
وتتواجد الجيود المحيطية في كل المحيطات الرئيسية
في العالم حيث تمثل أكثر من 20 ٪ من سطح الأرض .

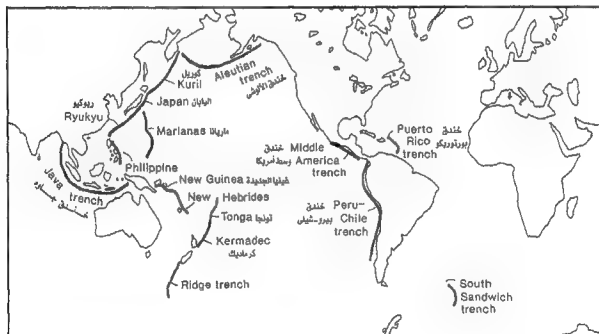


- 54 -

متر، وفي بعض الأماكن قد تشغل تلك الحيتود نصف وسط المحيط إلى مستوى سطح البحر ليكون جزراً بركانية، وأكبر تلك الجزر جزيرة أيسلندة التي تقع على المساحة الكلية لقاع المحيط.

حيد وسط المحيط الأطلنطي .

حيث يوجد واد ضيق يتميز بنشاط زلزالي وبركاني، بالإضافة إلى انبعاث حراري عال (شكل 8.1). يعرف هذا الوادي بوادي خسف **rift valley**. وتزايد أعمار الصخور البركانية في الحيد وسط المحيطية كلما ابتعدنا عن النطاق الأخدودي في اتجاه الشاطئ. وتتميز وديان الخسف بأن الصخور البركانية فيها تكون حديثة، كما تكون خالية تقريباً من الرواسب. ونادراً ما يرتفع حيد



شكل (9.1): خريطة توضح خنادق المحيط العميق، حيث تزيد أعماق المياه هنا ثلاثة أضعاف متوسط العمق في المحيط، كما تتميز الخنادق بأنها مستطيلة وضيقة وتتواجد في أماكن محددة. ويلاحظ أن الخنادق المحيطية تمتد موازية لقارة أو للجزر البركانية التي تتخذ شكل أقواس.

(After Abbott, P. L., 1999: *Natural Disasters*. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

المحيط الهادئ، حيث يصل عمق بعضها أو أجزاء منها إلى حوالي 10000 متر .

أ - نظرية الكوارث ومبدأ الوتيرة الواحدة

كان من المعتقد خلال القرنين السابع عشر والثامن عشر، وقبل أن يصبح علم الجيولوجيا علما قائما بذاته، أن كل معالم الكرة الأرضية من الجبال والوديان والمحيطات قد نشأت نتيجة عدد قليل من الكوارث الفجائية الكبيرة . وكان يُعتقد أن هذه الكوارث كانت من الضخامة بحيث لا يمكن شرحها بالمفاهيم العادية. كما اصطلح على تسمية النظرية التي تشمل هذه الفكرة نظرية الكوارث **catastrophism** أو الكوارثية والتي وضعها العالم الفرنسي جورج كوفيه **Georges Cuvier** (1769-1832م).

وفي أواخر القرن التاسع عشر جمع الطبيب الإسكتلندي جيمس هاتون **James Hutton** (1756-1797م) العديد من المشاهدات التي مكنته من التوصل إلى نظرية جديدة، تضاد نظرية الكوارث، وتشرح كيف تعمل الأرض، وعرفت هذه النظرية بقانون أو مبدأ الوتيرة الواحدة **principle of uniformitarianism**، وينص على أن كل مظاهر الأرض الطبيعية والحوية، سواء منها ما هو في الحاضر أو ما كان في الماضي، قد أنتجت العمليات الجيولوجية نفسها التي تعمل اليوم . كما يمكن تفسير الأحداث الجيولوجية التي وقعت في الماضي من خلال دراسة الظواهر والعمليات التي تدور على سطح الأرض اليوم . فمثلا عندما نرى علامات نيم **ripple marks** على سطح حجر رملي قديم، فإننا نفترض أنها تكونت

III - ديناميكية عمل كوكب الأرض: الأرض دائبة الحركة

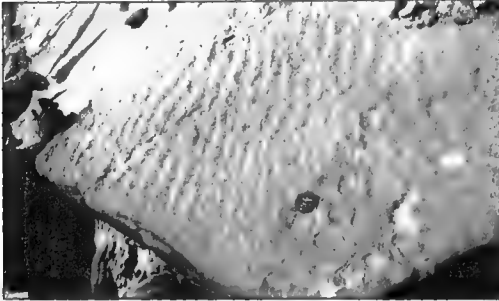
من المعروف أن الأرض مرت عبر تاريخها الطويل بكثير من التغيرات . وهنا يبرز سؤال مهم وهو : ما هي القوى المحركة لتلك الأحداث ؟ . وتكمن الإجابة في نظرية تكتونية الألواح **theory of plate tectonics** . وتفترض هذه النظرية أن الغلاف الصخري الصلب الخارجي للأرض مقسم إلى عدد من القطع الصلبة، التي تتحرك جانبا ببطء وتعرف بالألواح **plates** . ونتيجة لحركة تلك الألواح فإنها تتفاعل مع بعضها بعضا عند حوافها باستمرار، مما ينشأ عنه نشاط زلزالي وبنائي على امتداد تلك الألواح . وتقدم هذه النظرية شرحا لكيفية تكوّن الألواح وميكانيكية حركتها وتداخلها واستهلاكها لبعضها البعض، كما تفسر كيف تكونت القارات وأيضا النشاط الزلزالي والبركاني والحركات البانية للجبال وغيرها من الظواهر الجيولوجية التي تحدث على الأرض .

ومن المهم قبل أن نتناول شرح نظرية تكتونية الألواح أن نعرض لبعض النظريات العلمية، التي سبقت تلك النظرية وحاولت شرح طريقة عمل الأرض .

بالطريقة نفسها التي تتكون بها علامات النيم اليوم ويمكن تلخيص مبدأ الوتيرة الواحدة في جملة تحت تأثير حركة المياه أو الرياح (شكل 10.1). مختصرة تقول: "إن الحاضر مفتاح الماضي". إلا أن العالم



أ



ب

شكل (10.1): توضيح مبدأ الوتيرة الواحدة Principle of uniformitarianism

- (أ) علامات نيم حديثة في كتيان رملية متحركة حيث تصطف مويجات من الرمل في نمط منتظم ، وتكون قممها عمودية على اتجاه الرياح. طريق قفط - القصير ، الصحراء الشرقية - مصر (أ. د. ممدوح عبد الغفور حسن ، هيئة المواد النووية).
- (ب) علامات نيم قديمة في صخور حجر رملي من تكوين الطارف التابعة للمصر الطاشيرى - وسط الصحراء الشرقية - مصر .
- (د. محمد ضياء الدين كامل - قسم الجيولوجيا - جامعة الأزهر) .

تغيرات في المجموعات الحية تؤدي إلى ظهور أنواع جديدة باستمرار . وبذلك أدى دارون لعلوم الحياة الدور نفسه الذي لعبه هاتون وليل لعلم الجيولوجيا .

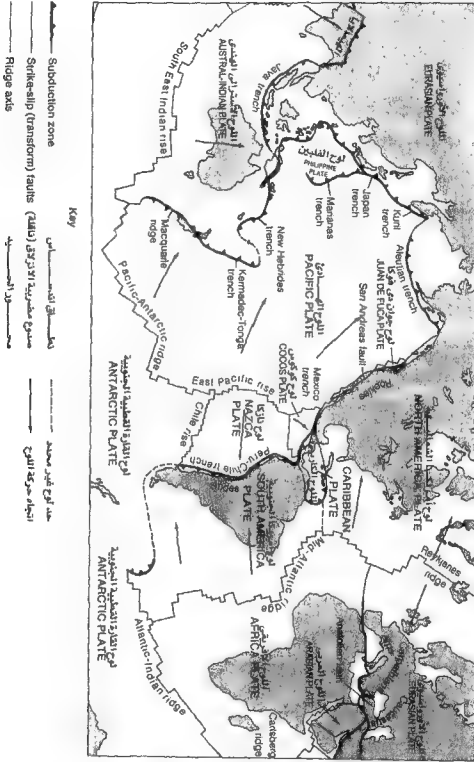
وقد ثبت من تطبيق مبدأ الوتيرة الواحدة أن الأرض قديمة للغاية ، لأن العمليات الجيولوجية تستغرق وقتا طويلا لحدوثها ، فمثلا تجوية جبل شاهق أو نقل كميات ضخمة من الرمال بواسطة مجرى مائي تتطلب فترة زمنية تقدر بملايين السنين . كما أن تطور الحياة على الأرض يتطلب زمنا طويلا أيضا . إلا أنه لوحظ أن تاريخ الأرض شهد عددا من الكوارث مثل الانقراض الجماعي لمجموعة الديناصورات في نهاية العصر الطباشيري قبل 65 مليون سنة ، مما يشير إلى أن نظرية الكوارث قد يكون من الممكن تطبيقها في بعض الأحيان أيضا .

ب - تكتونية الألواح: نظرية شاملة لعلم الجيولوجيا اجتاحت علم الجيولوجيا ثورة فكرية كبيرة في ستينيات القرن الماضي ، نتيجة لظهور نظرية تكتونية الألواح ، مثلما حدث في علم الفيزياء عند بدايات القرن العشرين عندما ظهرت نظرية النسبية ، وكما حدث في علوم البيولوجيا في منتصف القرن العشرين عندما اكتشف الحامض النووي DNA ، والذي مكن العلماء من شرح قوانين الوراثة . وقد حاول الجيولوجيون على امتداد 200 سنة سابقة وضع نظريات عديدة لشرح كيف نشأت الجبال وتفسير النشاط البركاني وغيرها من الظواهر الجيولوجية

الإنجليزي تشارلز ليل Charles Lyell (1797-1875م) كان له دور أساسي في دعم هذه النظرية ، حيث لم يُثبت فقط أن العمليات الجيولوجية التي كانت في الماضي هي العمليات نفسها التي تعمل على الأرض حاليا ، وإنما أثبت أيضا أنها تعمل بنفس المعدل بل وبالنظام نفسه .

هذا وقد لاقى الجزء الأول من النظرية الذي ينص على وجود العمليات نفسها في الماضي والحاضر قبولاً عاماً من معاصري ليل ، بينما لم يلق الجزء الثاني الخاص بثبات المعدل القبول نفسه لديهم . وأدخل هؤلاء ومنهم كونستنت بريفوست Constant Prevost مبدأ الواقعية actualism ، الذي ينص على أن العمليات الجيولوجية في الحاضر هي نفس العمليات التي كانت تعمل طوال الزمن الجيولوجي ، ولكن كان معدل عملها يتغير من زمن لآخر ، بسبب وجود تأثيرات إضافية أو توافق تأثير بعض العوامل مع بعضها في الزمن نفسه .

وبحلول عام 1850 م ، كان مبدأ الوتيرة الواحدة في الجانب الفيزيائي قد لاقى قبولاً في أوساط العلماء ، إلا أنه لم يلق القبول نفسه في الجانب البيولوجي حتى من جانب تشارلز ليل نفسه . واستمر الحال كذلك حتى أنسى تشارلز دارون Charles Darwin (1809-1882م) ليقدّم نظرية التطور Theory of evolution ، والتي هي تطبيق لفكرة الوتيرة الواحدة ولكن في الجانب البيولوجي ، حيث تؤدي التغيرات البسيطة في الكائنات الحية عبر فترات زمنية طويلة إلى



شكل (11.1): ألواح القشرة الأرضية التي تغطي سطح الكرة الأرضية في الوقت الحاضر . حيث تتحرك الألواح الصلبة ببطء أفقياً في اتجاه بعضها البعض ، أو تتحرك متباعدة عن بعضها البعض . وتفترض الأسهم الموضحة على الألواح أن اللوح الإفريقي لا يتحرك . وتنفصل الألواح على امتداد جيود وسط المحيط mid-oceanic ridges كما قد تنزلق أفقياً أمام بعضها البعض على امتداد الصلوع الناقلة transform faults وتتقارب على امتداد نطاقات الاندساس subduction zones .

(After Dewey, J.F., 1972: Plate tectonics. Sci. Am., Inc.).

الماء . وتتراوح سرعة الألواح من 1 إلى 12 سم في العام . ويمكن أن تنشئ الألواح قليلاً ، مما يسبب حدوث التواءات لطيفة لأعلى أو لأسفل في القشرة الأرضية . وتعتبر حدود الألواح هي الأماكن الوحيدة التي يحدث فيها تشوه شديد ، حين تصطدم الألواح ببعضها بعضاً .

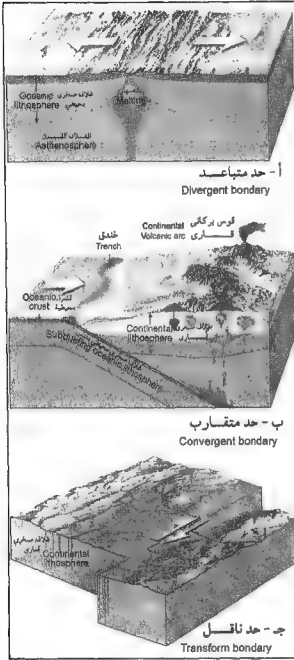
وتختلف مساحة الألواح كثيراً ، حيث إن أكبرها مساحة هو لوح المحيط الهادى الذى يقع بكامله تقريباً تحت مياه المحيط . أما بقية الألواح الكبيرة فإنها تتكون من جزء من قشرة قارية وجزء من قشرة محيطية . وعلى الجانب الآخر ، فإن هناك عدداً من الألواح الصغيرة التى تتكون كلية من قشرة محيطية مثل لوح الفلبين ولوح نازكا غرب شاطئ أمريكا الجنوبية ، أو من قشرة قارية كلية مثل اللوح العربى .

حركات الألواح

يرجع السبب فى حركة الألواح إلى أن باطن الأرض مازال ساخناً ، كما أن الغلاف اللدن (الأسثنوسفير) ساخن أيضاً وقابل للتشكل ، على الرغم من أنه فى حالة صلابة تقريباً . ويتميز الغلاف اللدن بقدرته على الانسياب تحت تأثير القوى التى تسببها تيارات الحمل الدورانى convection currents . وتيارات الحمل الدورانى هي الميكانيكية التى تنتقل بها الحرارة التى تسبب صعود المواد الساخنة الأقل كثافة وهبوط المواد الباردة الأكثر كثافة . والحمل الدورانى هو خاصية مميزة للسوائل والغازات ، حيث تشاهد تيارات الحمل الدورانى فى الماء المغلى فى كأس به ماء ، وكذلك

الأخرى ، إلا أنه لم يتم التوصل إلى نظرية واحدة تشرح كل الظواهر والعمليات الجيولوجية . بينما نستطيع أن ندعى الآن أن لدينا نظرية واحدة تشرح الكثير من المظاهر الجيولوجية الكبيرة فى الأرض . وبالإضافة إلى ذلك فهناك بعض ظواهر ومجالات أخرى : مثل تصنيف وتوزيع الصخور ومواقع البراكين والخصائص المميزة لها وأحزمة الزلازل وأنظمة الجبال وأحواض المحيطات ، كانت تعامل سابقاً كموضوعات منفصلة عن بعضها البعض . أما اليوم فإن الجيولوجيين يتعاملون مع كل تلك الموضوعات وغيرها فى سياق نظرية واحدة شاملة هي نظرية تكتونية الألواح plate tectonic theory .

وتفترض نظرية تكتونية الألواح أن الكرة الأرضية مغلفة تماماً بالغلاف الصخرى الصلب ، والذى ينقسم إلى سبعة ألواح كبيرة وعدد من الألواح الصغيرة (شكل 11.1) . ويختلف سمك الألواح بين 100 إلى 200 كم فى الألواح المكونة من الوشاح العلوى والقشرة القارية ، بينما فى الألواح المكونة من الوشاح العلوى والقشرة المحيطية يتراوح السمك بين 10 كم عند الحيدود المحيطية و 100 كم فى أحواض المحيطات العميقة . وتحرك كل الألواح جانبياً كوححدات متناسكة مستقلة فوق الغلاف اللدن (الأسثنوسفير) ، والذى يكون فى حالة حركة أيضاً . بمعنى أن الألواح لا تتجدد أو تطوى ، مثل قطعة الورق المبللة وإنها تسلك سلوك ألواح الخشب الصلبة نسيباً فوق سطح



شكل (12.1): الأنواع المختلفة للمحدود بين الألواح، وتوضح الأسهم الحركة النسبية للألواح

(أ) حدود متباعدة divergent boundaries

(ب) حدود متقاربة convergent boundaries

(ج) حدود صدع ناقل transform fault boundaries

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

الدخان المتصاعد من المدفئة، وصعود الهواء الساخن إلى أعلى نحو سقف الغرفة وهبوط الهواء البارد إلى أرضية الغرفة. وتحدث حركة الحمل الدوراني في أي مادة مناسبة سائلة كانت أم صلبة قابلة للتشكل حينما تُسخّن من أسفل وتُبرّد من أعلى. وقد أظهرت التجارب أن الصخور لا تبدأ في الانصهار قبل أن تنساب، وقد تنساب الصخور، إذا كانت ساخنة بدرجة كافية، مثل السوائل اللزجة. مع ملاحظة أن معدلات الانسياب تكون بطيئة للغاية، وكلما ارتفعت درجة الحرارة كان الصخر أكثر ضعفاً، وأكثر قابلية للانسياب. وتصد السوائل والمواد الصلبة الساخنة تحت تأثير قوى الطفو؛ لأنها أصبحت أقل صلابة من المادة التي تعلوها. وتفقد المادة الحرارة وتبرد أثناء حركتها على السطح وتصبح أكثر كثافة، وبالتالي أثقل من المادة الموجودة أسفلها وتهبط تحت تأثير الجاذبية. وتستمر عملية الدوران طالما كان هناك انتقال للحرارة من أسفل إلى أعلى حيث السطح البارد.

2- حدود الألواح

يتواجد الكثير من المعالم الجيولوجية الكبيرة عند حدود الألواح، حيث تتفاعل الألواح مع بعضها البعض. ويوضح شكل (12.1) الأنواع الثلاثة من الحدود المعروفة، وهي كالتالي:

1. حدود متباعدة: حيث تنفصل الألواح وتحرك متباعدة عن بعضها البعض، مما يؤدي إلى نشأة غلاف صخري جديد من الصهارة الصاعدة.

ولنفهم كيف يتحرك اللوح ، فعلينا أن ننظر إلى الحزام الناقل للحقائب أو البضائع ، حينما يصعد من أسفل ويتحرك على امتداد طول معين ثم يتحرك لأسفل ليختفى . ويشبه لوح الغلاف الصخري الجزء العلوى من حزام ناقل يتحرك ببطء رغم كون اللوح الصخري عريضا وغير منتظم . ويتحرك كل لوح بعيدا عن مركز الانتشار ، كما لو أن هناك حزاما مستمرا على امتداد كسر في الوشاح يصعد لأعلى . وهذا التشبيه صحيح جزئيا ، لأن اللوح لا يكون عبارة عن شريط متناسك صلب ، وإنما يتكون من قشرة جديدة تضاف على امتداد الكسر . وهناك فرق آخر ، وهو أن اللوحين يتحركان في اتجاهين متضادين ، كما لو أن هناك حزامين ناقلين يتحركان في اتجاهين متضادين .

وعندما يحدث تباعد فى قشرة محيطية ، يتكون جيود وسط المحيط ، حيث تؤدي تيارات الحمل إلى صعود الصخر الساخن من الوشاح ، كما يتحرك الحد الفاصل بين الغلافين الصخري (الليثوسفير) واللدن (الاستينوسفير) قريبا جدا من قاع المحيط ، وتصبح بعض أجزاء الغلاف اللدن ساخنة لدرجة تكفى لأن يبدأ الانصهار . ويطلق على الصخر المنصهر مصطلح صهارة magma . حيث تصعد الصهارة التى تتكون فى الغلاف اللدن (الاستينوسفير) تحت جيود وسط المحيط إلى قمة الغلاف الصخري لتبرد وتتصلد لتكوّن قشرة محيطية جديدة (شكل 12.1 أ) . وتسمى الميكانيكية التى يتكون بها قاع المحيط الأطلنطى خلال

2. حدود متقاربة: حيث تتصادم الألواح أو يهبط أحدها تحت الآخر ويعود الغلاف الصخري إلى باطن الأرض.

3. حدود الصدع الناقل: حيث تنزلق الألواح أفقيا أمام بعضها البعض فتسطحن وتبرى حوافها نتيجة الانزلاق . وتكون الزلازل شائعة على امتداد حواف الصدوع الناقلة.

ونعرض فيما يلى وصفا مفصلا لكل من هذه الأنواع الثلاثة من الحدود :

الحدود المتباعدة

تسمى الحدود المتباعدة **divergent boundaries** أحيانا مراكز انتشار **spreading centers** ، حيث تتباعد الألواح المتجاورة بمعدل عدة سنتيمترات كل عام . وتعتبر الحدود المتباعدة أماكن لتكوين القشرة الأرضية ، حيث تثبت عند هذه الحدود المادة الصخرية الساخنة من الوشاح وتبرد وتتصلد وتكوّن قشرة محيطية جديدة ، لذلك يطلق عليها أيضا الحدود البناءة **constructive boundaries** . كما تتكون عندها سلاسل جبلية من البازلت مغمورة فى قيعان المحيطات ، والتى تعرف بجيود وسط المحيط **mid-ocean ridges** مثل جيد وسط الأطلنطى **mid-Atlantic ridge** . كما قد تتكون الحدود المتباعدة هذه بين لوحين قاريين مثل البحر الأحمر ، الذى يقع بين اللوح الإفريقى واللوح العربى.

الزمن الجيولوجي بالانجراف القارى **continental drift**. وليس معروفا على وجه الدقة سبب هذا الانجراف، وربما يرجع إلى تيارات حمل دوراني في الغلاف اللدن (الأستينوسفير) والغلاف الصخري (الليثوسفير). وقد شطرت مراكز الانتشار الغلاف الصخري وتكسرت القارة القديمة إلى عدة أجزاء تمثلها القارات الحالية. كما انجرفت تلك الأجزاء أو القارات الحالية إلى أوضاعها الحالية. ومناقش أدلة الانجراف القارى فى الفصل السابع عشر من الكتاب.

الحدود المتقاربة

فى الحدود المتقاربة **convergent boundaries** يتحرك لوحان فى اتجاه بعضهما متقاربين (شكل 12.1 ب). وفى هذه الحالة يهبط أحد اللوحين (اللوح المحيطي) تحت الآخر حتى يصل إلى الوشاح لينصهر فى الأعماق، مما يؤدي إلى تدمير المادة الصخرية للقشرة الأرضية، ولذلك يطلق على هذا النوع من الحدود أيضا مصطلح الحدود الهدامة **destructive boundaries**. وتعرف هذه العملية بالاندساس **subduction**، كما تسمى منطقة الحافة عندئذٍ نطاق اندساس **subduction zone**. وتؤدي قوى الاندساس والتصادم الهائلة إلى حدوث زلازل قوية. وتوجد الحدود المتقاربة أو الهدامة بين لوحين محيطيين مثل منطقة غور تونجا فى جنوب المحيط الهادى، أو بين لوح قارى ولوح محيطي مثل لوح نازكا المحيطي الذى يندس تحت الجانب القارى

160 مليون سنة الماضية، بانتشار قيعان المحيطات **seafloor spreading**. ويقدر معدل انتشار قيعان المحيطات بنحو 5 سم كل عام. وهذا المعدل غير ثابت ويتغير من مكان إلى آخر. ويبدو هذا المعدل بطيئا، إلا أنه يكون سريعا بدرجة تكفى لنشأة كل قيعان المحيطات الموجودة خلال الفترة الزمنية التى تمثل نحو 5% من تاريخ الأرض.

وعندما يتسبب حد التباعد (مركز الانتشار) فى انشطار قشرة قارية، فإنه تحدث سلسلة من الأحداث تبدأ بتكون خسيف **rift**، وهو عبارة عن وادى طويل تحده كسور وصدوع، مثل وادى الخسف الإفريقي **African Rift Valley** الذى يمتد فى إثيوبيا وكينيا وتنزانيا والمالاي. ويبدأ النشاط البركاني عندما يتحرك جزء القشرة القارية بعيدا (شكل 23.17). وتؤدي الحركة المستمرة إلى اتساع الخسيف وزيادة عمقه، مثل البحر الأحمر. وفى النهاية، تتحرك أجزاء القشرة القارية بعيدا عن بعضها لتتكون قشرة محيطية جديدة تفصل بين الحدين المتباعدين، ويتكون محيط جديد. فالمحيط الأطلنطي الحالى لم يكن له وجود قبل نحو 250 مليون سنة، بل كانت القارات الموجودة حاليا على جانبيه متصلة مع بعضها بعضا فى قارة واحدة عظمى تسمى البانجيا **Pangaea** (من اللاتينية بمعنى كل اليابسة). ومنذ نحو 200 مليون سنة بدأت تلك القارة الضخمة فى الانشطار على امتداد مراكز الانتشار. ويسمى تحرك القارات على امتداد

أعمق. وفي النهاية، يصبح سمك الغلاف الصخري ثابتاً ، على بعد نحو 1000 كم من حد التباعد (مركز الانتشار) ، كما يصبح بارداً وأكثر كثافة من الغلاف اللدن الساخن والضعيف أسفله ثم يبدأ في الغوص لأسفل . ويغوص الغلاف الصخري القديم مع القشرة المحيطية التي تعلوه في الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) ، ثم في الغلاف الأوسط (الميزوسفير). وكما ذكرنا سابقاً، فإن العملية التي يغوص فيها الغلاف الصخري في الغلاف اللدن تسمى عملية الاندساس ، وتسمى الحافة التي تندس على امتدادها الألواح باسم نطاقات الاندساس . وتؤدي عملية الاندساس إلى تكوّن خندق trench ضيق طويل عند قاع المحيط (يبلغ عرضه نحو 100 كم).

وعندما تغوص حافة الغلاف الصخري المتحركة ببطء في الغلاف اللدن ، فإنها تدخل في بيئة مرتفعة الحرارة والضغط . وتنصهر القشرة المحيطية الرقيقة الموجودة فوق الغلاف الصخري الهابط وتتكون صهارة . وتصل بعض الصهارة إلى السطح لتكوّن براكين تندخل في اللوح العلوي الراكب overriding plate (سواء كان محيطياً أم قارياً). ونتيجة لذلك ، تتميز نطاقات الاندساس بوجود قوس من البراكين المتوازية ، ولكن على بعد يراوح بين 150 إلى 400 كم من الخندق الذي يميز حافة اللوح ، حيث تعتمد تلك المسافة على زاوية ميل اللوح الهابط المندس .

كما قد توجد الحدود المتقاربة أيضاً ، عندما تصادم قارتان ليتكوّن ما يعرف بنطاق الاصطدام collision zone ، مثل منطقة جبال الهيمالايا التي ارتفعت بسبب تصادم كتلة الهند بكتلة أوراسيا في حين الميوسين .

ويعتقد العلماء أنه حدثت تصادمات بين قارات الأرض عدة مرات خلال الزمن الجيولوجي . ومثال ذلك تكون قارة البانجيا أو ما يطلق عليها أم القارات ، والتي تكونت أثناء العصر البرمي من تجمع كل يابس الكرة الأرضية في كتلة واحدة منذ نحو 225 مليون سنة من الآن .

نطاقات الاندساس: يكون الغلاف الصخري رقيقاً بالقرب من حد التباعد (مركز الانتشار) عندما يقترب الحد الفاصل بين الغلاف الصخري (الليثوسفير) والغلاف اللدن (الأسثينوسفير) من سطح الأرض . وترجع رقة الغلاف الصخري إلى أن الصهارة الصاعدة تسبب ارتفاع درجة حرارة الغلاف الصخري ، بينما تبقى الطبقة العليا الرقيقة منه تحتفظ بخصائص الصخر الصلب وشدته (شدة الصخر هي أقصى إجهاد يتحمله جسم صلب دون أن يتمزق أو يتشوه تشوهاً لدناً).

وعندما يتحرك الغلاف الصخري بعيداً عن حد التباعد (مركز الانتشار) ، فإنه يبرد ويصبح أكثر كثافة ، كما يصبح الحد الفاصل بين الغلاف الصخري والغلاف اللدن أكثر عمقاً. ونتيجة لذلك ، فإن الغلاف الصخري يصبح أكثر سمكاً ، ويتحرك الحد الفاصل بين الغلافين الصخري واللدن إلى مسافات

توجد صخور مختلفة النوع والعمر على جانبي الصدع. ولا يحدث الانزلاق بلطف، بل قد تشابك في بعض الأحيان حدود الألواح مما يؤدي إلى ثنى وطى الصخور على جانبي الصدع الناقل. وعندما يتكسر ذلك الجزء المتشابك، فإن الصخر المشني يتحرك فجأة، وتسبب الانزلاقات الفجائية في حدوث زلازل مدمرة.

IV التفاعلات بين طبقات الأرض الداخلية والخارجية

إذا نظرنا إلى كوكب الأرض من الفضاء، فسرى أن الأرض لا تتكون من صخور وتربة فحسب، وإنما سنرى دوامات عاقلة من السحب، وكذلك امتدادا شاسعا من المحيطات. ولذلك تقسم البيئة الفيزيائية للأرض إلى ثلاثة أقسام هي: الغلاف الجوى والغلاف المائي والغلاف الصخري. والغلاف الجوى **atmosphere** هو ذلك الغلاف الرقيق من الغازات الذي يحيط بالأرض، والذي يتميز بوجود دوامات السحب، ويصل سمكه إلى مئات الكيلومترات، ويعد جزءا لا يتجزأ من كوكب الأرض. ولا يوفر الغلاف الجوى الهواء اللازم للحياة فقط، بل يعمل على حمايتنا من حرارة الشمس الحارقة وإشعاعاتها الخطرة. بينما يشمل الغلاف المائي **hydrosphere** طبقة الماء غير المستمرة، والتي نراها في ذلك الامتداد الشاسع للمحيطات. ويشمل الغلاف المائي بالإضافة للمحيطات خزانات الماء العذب الموجودة في الأنهار والبحيرات والكتل الجليدية، إلى جانب المياه الجوفية (الأرضية) تحت سطح الأرض. أما الغلاف الصخري

نطاقات التصادم: يكون الغلاف الصخري للقارات أخف من أن يغوص أو يندس في الغلاف اللدن. ولذلك، فإن كتل القشرة الأرضية التي تكون في حجم القارات تطفو فوق ألواح الغلاف الصخري من مكان إلى مكان آخر فوق سطح الأرض. وتتوقف الحركة حينها تصطدم كتلتان من كتل القشرة القارية. ويحدث مثل هذا التصادم فقط حينها يحدث اندساس لقشرة محيطية تحت كتلة واحدة من الكتلتين القاريتين. وحيث إن اللوح المحيطي المندس يحمل أيضا كتلة من القشرة القارية، فإنه يحدث تصادما لا يمكن تجنبه عندما تتقابل الكتلتان القاريتان على امتداد نطاق الاندساس. وتكون نطاقات الاندساس سلاسل جبلية عالية، مثل جبال الهيمالايا وجبال الألب.

حدود الصدوع الناقلة

تنزلق الألواح أفقيا أمام بعضها البعض عند حدود الصدوع الناقلة (شكل 12.1 ج)، ولا تنشأ عنها قشرة أرضية جديدة كما يحدث عند الحدود المتباعدة، كما لا يحدث تحطم أو استهلاك للقشرة كما يحدث عند الحدود المتقاربة في الخنادق المحيطية. والصدوع الناقلة **transform fault boundaries** عبارة عن كسور رأسية عظيمة الامتداد تقطع الغلاف الصخري، مثل صدع سان اندرياس **San Andreas fault** في ولاية كاليفورنيا، حيث ينزلق لوح المحيط الهادى قبالة لوح أمريكا الشمالية في اتجاه شمال غرب. وحيث إن الألواح تنزلق قبالة بعضها البعض للملايين السنين، فإنه

مسارات دورية. ولذلك تحافظ هذه العناصر على ثباتها، لأن الأجزاء المختلفة في المسارات تعادل بعضها البعض، حيث تتساوى المواد المضافة مع المواد المزالة من الدورة. وهكذا، يمكن أن تشمل الدورة cycle عدة أغلفة وعدة عمليات تعمل بمعدلات زمنية مختلفة. والدورات الثلاث التالية هي أهم الدورات التي تحدث في الغلاف الصخري الصلب للأرض:

1- دورة الصخور **rock cycle** وهى تصف كل العمليات التي يتكون بها صخر من نوعية ما من النوعين الآخرين. فالصخور الرسوبية تتحول إلى الصخور المتحولة أو تنصهر لتنشأ الصخور النارية. وقد ترفع إلى سطح الأرض ليتم تعريضها لتتكون الرواسب التي تتصلب لتكوّن الصخور الرسوبية مرة ثانية.

2- الدورة المائية **hydrologic cycle** وهى تصف التحرك الدورى للماء من المحيط إلى الغلاف الجوى بالتبخير، ثم إلى سطح الأرض عند سقوط الأمطار فتصبح مياه سطحية بالصرف السطحي (كمية المطر التي لا تتخلل الأرض) أو مياه جوفية **groundwater** تحت سطح الأرض، ثم إلى المجارى المائية مرة أخرى إلى البحر. وبالطبع، فالماء من أهم العوامل الجيولوجية، حيث يعمل كمذيب لكثير من المركبات الكيميائية، ويساعد على تجوية الصخور، ويمثل وسطاً أساسياً لتكوين معظم الرواسب.

lithosphere فهو ذلك الجزء الخارجى الصلب من الأرض، والذي نراه في القارات والجزر. ويتكون الغلاف الصخري أساساً من الصخور والحطام الصخري (الأديم) **regolith**. وهو غطاء غير منتظم يتكون من حبيبات الصخر غير المتماسكة التي تغطي الأرض الصلبة. وبالإضافة إلى هذه الأغلفة الفيزيائية الثلاثة، فهناك الغلاف الحيوى **biosphere** (كلمة bios من اليونانية بمعنى حياة)، وهو يشمل كل أشكال الحياة على الأرض، ويشمل أجزاء الغلاف الصخري والمائي والجوى التي يمكن أن توجد بها الكائنات الحية

ومن المعروف الآن، أن الحركة المستمرة للغلافين المائي والجوى اللذين يغلفان الأرض هي المسؤولة عن العديد من ملامح سطح الأرض في القارات. فبدون المياه فوق سطح الأرض لن توجد أنهار أو وديان أو مئالج أو حتى القارات بالصورة التي نعرفها. وبدون الغلاف الجوى المتحرك، فلن توجد كسبان رملية في الصحراء أو أى ميكانيكية لنقل الماء من المحيطات إلى الأرض. وحيث إن المادة تتحول باستمرار من أحد أغلفة الأرض إلى الآخر، فإنه تبرز هنا بعض الأسئلة، مثل: لماذا يكون تركيب الغلاف الجوى ثابتاً؟ ولماذا لا يتغير ماء البحر ليصبح أكثر ملوحة أو أكثر عذوبة؟ ولماذا يكون صخر عمره 2 بليون سنة له تركيب صخر نفسه عمره 2 مليون سنة؟. وتكمن الإجابة عن كل هذه الأسئلة في أن عمليات الأرض الطبيعية تسير في

المشتري وزحل وأورانوس ونبتون من أجسام أكبر حجماً وأقل كثافة وذات غلاف جوى، مكون من الهيدروجين والهيليوم. أما بلوتو فقد تدارس الفلكيون عام 2006م إمكانية إخراجها من زمرة كواكب المجموعة الشمسية لعدم انطباق التعريف الجديد للكوكب عليه، إلا أن هذا الأمر لم يقرر بشكل نهائى بعد.

3. يرجع أصل المجموعة الشمسية إلى تصادمات المادة في سحابة دوارة من الغازات والرماد الدقيق. ولقد أدت الجاذبية إلى تراكم المادة نحو المركز وزيادة كثافتها لتكوّن الشمس الابتدائية، ثم تكوّن قرص من الغاز والغبار غلف الشمس الابتدائية سمي بالسديم الشمسى. وعندما يبدأ هذا القرص في التبرد، تتكون جسيمات كوكبية تصادم وتتلاحم؛ لتكوّن في النهاية الكواكب الثانية المكونة لمجموعتنا الشمسية منذ حوالى 4.5 بليون سنة.

4. حدثت عملية التمايز مبكراً في تاريخ الأرض، حيث كان كوكب الأرض ساخناً بدرجة كافية. ولقد أدت عملية التمايز إلى تغير كوكب الأرض من كوكب متجانس أصلاً إلى كوكب مكون من طبقات مختلفة في التركيب وهى: اللب والوشاح والقشرة، التى تقسم إلى قشرة محيطية يبلغ متوسط سمكها 8 كم وقشرة قارية يبلغ متوسط سمكها نحو 45 كم.

5. يمكن تقسيم الأرض طبقاً لخصائصها الفيزيائية إلى أغلفة هى: (1) الغلاف الصخري وهو النطاق

3- الدورة التكتونية **tectonic cycle** وهى تشمل تحركات وتفاعلات ألواح الغلاف الصخري، والعمليات التى تحدث فى باطن الأرض وتسبب حركات الألواح.

والدورات الثلاث السابقة هى دورات وثيقة الصلة بعضها ببعض بسبب تداخل العمليات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية المسببة لها. وتشمل تلك الدورات الثلاث معظم الموضوعات التى سيتم مناقشتها فى هذا الكتاب. وهناك بالطبع عديد من الدورات الأخرى، مثل الدورة الجيوكيميائية **geochemical cycle** والتى تتبع تحركات العناصر الأساسية للحياة، وهى: الكربون والأكسجين والكبريت والهيدروجين والفوسفور.

الملخص

1. علم الجيولوجيا هو العلم الذى يختص بدراسة الأرض وتاريخها ومكوناتها وتركيبها البنائى الداخلى ومظاهرها السطحية. ويهتم علم الجيولوجيا الفيزيائية - وهو أحد الفروع الرئيسية لعلم الجيولوجيا - بدراسة العمليات التى تدور فوق أو تحت سطح الأرض والمواد التى تشملها وتؤثر فيها تلك العمليات.

2. تدور حول الشمس ثمانية كواكب منها أربعة كواكب داخلية تتكون من أجسام صخرية، وتكون صغيرة كثيفة وهى: عطارد والزهرة والأرض والمريخ، بينما تتكون الكواكب الأربعة الخارجية

الانتشار الذى يسبب انشطار قارة بوجود خسييف عظيم فى القشرة القارية.

9. عندما يتحرك غلاف صخرى محيطى بعيدا بدرجة كافية عن مركز انتشار ساخن، فإنه يهبط فى الوشاح حيث يتكون نطاق اندساس. وتتميز نطاقات الاندساس بوجود الخنادق، وهى أعمق أجزاء فى المحيط. وعند عمق نحو 100 كم، فإن القشرة الهندسة تصبح ساخنة بدرجة كافية وتنصهر فى النهاية، وتبعد لتكوّن سلسلة من البراكين.

10. تقسم البيئة الفيزيائية للأرض إلى ثلاثة أغلفة هى: الغلاف الجوى والغلاف المائى والغلاف الصخرى، كما يضاف إليها الغلاف الحيوى الذى يضم كل أشكال الحياة على الأرض.

11. أهم الدورات التى تصف أنشطة الأرض الصلبة هى: دورة الصخور والدورة المائية والدورة التكتونية. وتصف دورة الصخور أنواع الصخور الرئيسية الثلاث النارية والمتحولة والرسوبية، والعلاقات بين عمليات ومواد الأرض التى تلقى الضوء على تحول أحد أنواع الصخور إلى النوع الآخر. وتصف الدورة المائية التحرك الدورى للماء بين المحيط والغلاف الجوى واليابسة. وتشمل الدورة التكتونية تحركات وتفاعلات ألواح الغلاف الصخرى والعمليات الداخلية التى تتم فى باطن الأرض.

الخارجى من الأرض الصلبة، ويتكون من صخر صلب. وتكون قاعدة الغلاف الصخرى المحيطى

عند عمق حوالى 100 كم، بينما تكون قاعدة الغلاف الصخرى القارى عند عمق حوالى 200 كم. (2) الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) ويوجد

أسفل الغلاف الصخرى، وحتى عمق 350 كم وهو منطقة مرتفعة الحرارة تجعل الصخر ضعيفا وسهل التشوه. (3) الغلاف الأوسط وهو منطقة صلبة توجد أسفل الغلاف اللدن. ويوجد داخل

اللب منطقتين مختلفتين فى الخصائص الفيزيائية، ولكن لها التركيب نفسه، وهما اللب الداخلى الذى يكون صلبا واللب الخارجى الذى يكون منصهرا.

6. تفترض نظرية تكتونية الألواح أن الغلاف الصخرى يتكون من سبعة من الألواح الكبيرة وعدد آخر من الألواح الصغيرة التى تنزلق ببطء فوق الغلاف اللدن، ويمعدل حركة يتراوح بين 1 سم و 12 سم فى العام.

7. تتميز ألواح الغلاف الصخرى بوجود ثلاثة أنواع من الحواف وهى: (1) الحواف المتباعدة (وتسمى مراكز انتشار)، (2) الألواح المتقاربة (وتشمل نطاقات الاندساس ونطاقات التصادم)، (3) الصدوع الناقلة.

8. عندما يتواجد مركز انتشار فى قشرة محيطية، فإنه يتميز بوجود حيد وسط المحيط. ويتميز مركز

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

<http://www.mhhe.com/plummer>
<http://www.prenhall.com/tarbuck>
<http://www.mhhe.com/earthsci/geology/plummer-old/www.mhmtl>
<http://www.geology.com/>
<http://www.geosociety.org/>

المصطلحات المهمة

abyssal plain	lithosphere سهل سحيق	الغلاف الصخري (الليثوسفير)
actualism	magma مبدأ الواقعية	صهارة
asthenosphere	mantle الغلاف اللدن (الأسثينوسفير)	وشاح
atmosphere	mesosphere الغلاف الجوي	الغلاف الأوسط (الميزوسفير)
biosphere	mid-ocean ridges الغلاف الحيوي	حيود وسط المحيط
catastrophism	nebular hypothesis نظرية الكوارث (الكوارثية)	الفرضية السديمية
collision zone	oceanic crust نطاق الاصطدام	قشرة محيطية
continental crust	oceanic ridges قشرة قارية	حيود محيطية
continental drift	Pangaea انجراف قاري	بانجيا
continental rise	physical geology ارتفاع قاري	الجيولوجيا الفيزيائية
continental shelf	plate رف قاري	لوح
continental slope	regolith منحدر قاري	حطام صخري (أديم)
convergent boundaries	rift valley حدود متقاربة	وادي خسف
core	rock لب	صخر
crust	rock cycle قشرة	دورة الصخور
differentiation	seafloor spreading تمايز	انتشار قيعان المحيطات
divergent boundaries	subduction حدود متباعدة	الاندساس
evolution, theory of	subduction zone نظرية التطور	نطاق الاندساس
geologic time scale	tectonic cycle مقياس الزمن الجيولوجي	دورة تكتونية أو بنائية
geology	plate tectonics, theory of جيولوجيا (علم الأرض)	نظرية تكتونية الألواح
Gondwanaland	transform fault boundaries أرض الجندوانا	حدود صاعد ناقل
historical geology	trench (oceans) الجيولوجيا التاريخية	خندق (محيطات)
hydrologic cycle	uniformitarianism, principle of الدورة المائية	مبدأ الوتيرة الواحدة
hydrosphere	الغلاف المائي	
Laurasia	لوراسيا	

الأسئلة

- 1- يشمل علم الجيولوجيا مجالين رئيسين ، صفهما .
- 2- وضح كيف يساعد مبدأ السوية الواحدة الجيولوجيين على فهم تاريخ الأرض.
- 3- صف باختصار الخطوات التى تكونت بها الكواكب من السحابة الضخمة المكونة من الغاز والغبار.
- 4- ما السبب فى تمايز الأرض ، وما نتيجة هذا التمايز؟
- 5- كيف تختلف الكواكب الداخلية عن الكواكب الخارجية ولماذا؟
- 6- يمكن تقسيم الأرض إلى أغلفة اعتيادا على خصائصها الفيزيائية ، صف تلك الأغلفة .
- 7- كيف ولماذا يتغير سمك الغلاف الصخري؟ قارن بين الغلافين الصخري واللدن .
- 8- اذكر وصف باختصار الأغلفة التى تكوّن بيتنا .
- 9- لامتثل الشواطئ الحالية الحد بين القارات والمحيطات ، اشرح .
- 10- باستخدام دورة الصخور ، وضح كيف يتحول أحد أنواع الصخور الثلاثة إلى نوع آخر.
- 11- صف العالم الطبوغرافية لقاع المحيط ، ووضح كيف ترتبط بتكتونية الألواح.
- 12- اشرح الفكرة الأساسية لنظرية تكتونية الألواح .
- 13- هل تظل عمليات دورة الصخور والدورة التكتونية والدورة المائية ثابتة على امتداد الزمن الجيولوجي؟ اشرح ذلك .
- 14- ما اسم اللوح التكتونى الذى تعيش عليه ، وما الألواح التى تحيط به ؟
- 15- أين تنشأ صخور القشرة ؟ ولماذا تحتفظ الأرض بحجمها دون زيادة ؟

الفصل

2

المعادن : الوحدة البنائية للصخور

I. تعريف المعدن

II. المعادن وتركيبها الكيميائي :

أ. تركيب الذرات

ب. العدد الذري والكتلة الذرية

III. التفاعلات الكيميائية :

أ. اكتساب أو فقد الإلكترونات

ب. المساهمة في الإلكترون

ج. الجدول الدوري للعناصر

IV. الروابط الكيميائية :

أ. الروابط الأيونية

ب. الروابط التساهمية

V. التركيب الذري للمعادن :

أ. طريقة تكوين المعادن

ب. الإحلال الأيوني

VI. المعادن المكونة للصخور :

أ. السيليكات

ب. الكربونات

ج. الأكاسيد

د. الكبريتيدات

هـ. الكبريتات

VII. الخواص الفيزيائية للمعادن :

أ. الصلادة

ب. الانقسام

ج. المكسر

د. البريق

هـ. اللون والمخدش

و. الكثافة والكثافة النوعية

ز. هيئة البلورة

VIII. المعادن كأدلة على بيئات التكوين

استخلصوا هذا المعدن النفيس من العروق الحاملة له . كما استعمل قدماء المصريين معدن الهيماتيت الأحمر - وهو أحد معادن الحديد - في طلاء مقابرهم ، كما استخلصوا معادن النحاس الأخضر والأزرق ، واستخدموها في طلاء مقابرهم وصناعة الأدوات المختلفة منها بعد استخراج فلز النحاس . كما بحث قدماء المصريين عن الأحجار الكريمة واستعملوها في صناعة الحلى للزينة . وتسهم المعادن منذ ذلك التاريخ بنصيب وافر في تطور الحضارة الإنسانية ، حتى أن هناك عصوراً تعرف باسم المعدن الذى كان الاستخدام شائعاً فيها ، مثل عصر الحديد وعصر النحاس ، حتى عصرنا الحاضر الذى يعرف بعصر الذرة ، والتى نحصل عليها أساساً من تحطيم فلز اليورانيوم المشع .

وبالإضافة إلى الاستخدامات الاقتصادية للصخور والمعادن ، فإن كل العمليات التى حدثت فى الماضى وتدخل فى إطار علم الجيولوجيا ، مثل : التصدقات البركانية وبناء الجبال والتجوية والتعرية والزلازل ، تعتمد بصورة ما على خصائص تلك المواد الرئيسية المكونة للأرض . نقتدّم المعادن الموجودة فى بعض الصخور البركانية الدليل على ثورة بركان ، والذى يؤدى إلى تواجد صخر منصهر يتدفق إلى سطح الأرض عند درجة حرارة عالية ، قد تصل إلى نحو 1000°م .

تعتبر صخور القشرة الأرضية ، وأيضاً مياه المحيطات ، مصدراً لعديد من المعادن المهمة . وفى الواقع ، فإن كل منتج مصنع يحتوى عملياً على مواد مستمدة من المعادن . ويعرف معظم الناس الاستعمالات العادية لعديد من الفلزات الأساسية ، والتى تشمل الألومنيوم المستخدم فى علب المشروبات الغازية وخطافها ، والنحاس المستخدم فى شبكات الأسلاك الكهربائية ، والذهب والفضة المستخدمين فى الحلى . بينما لا يدرك البعض أن أقلام الرصاص تحتوى على معدن الجرافيت ، وأن مصدر بودرة التلك التى تستخدم للأطفال هى صخور متحولة مكونة من معدن التلك ، وأن معظم رسال شواطئ الساحل الشمالى بمصر تتكون من حبيبات معدن الكوارتز . كما أن البعض قد لا يعرف أن مثقاب الحفر الذى يستخدم لحفر طبقات الصخور أثناء البحث عن البترول يكون مطعماً بحبيبات من معدن الماس ، وأن معدن الكوارتز هو أحد المكونات الرئيسية لمادة الزجاج . ونتيجة لزيادة طلب المجتمعات الحديثة على المواد الخام ، فإن الحاجة تزداد لاكتشاف مواقع جديدة لمعادن مهمة .

وقد ساهمت المعادن فى بناء الحضارة الإنسانية ، حيث نجد فى آثار قدماء المصريين ما يدلنا على أنهم أنشأوا مناجم للذهب منذ آلاف السنين ، فقد

مكونات أصغر. أما معظم الصخور فيمكن فصلها إلى مكوناتها المعدنية باستخدام وسائل مناسبة. وهناك قلة من الصخور مثل الحجر الجيري تحتوي على نوع واحد من المعادن هو الكالسيت، بينما هناك صخور أخرى، مثل الجرانيت، تتكون ليس من معدن واحد، وإنما من عدد من المعادن. ولكي نعرف ونصنف الأنواع المختلفة من الصخور الموجودة على الأرض وكيف تكونت، فإننا يجب أن ندرس المعادن المكونة لها.

ونعود إلى التعريف السابق للمعدن، فنجد أنه ينص على أن المعدن يتكون من مادة صلبة ومتبلورة، مما يعني استبعاد كل السوائل والغازات، وعندما نقول إن المعدن متبلور *crystalline*، فإننا نقصد أن الجزيئات الصغيرة المكونة له - الذرات - تكون مرتبة بنظام ثابت في الأبعاد الرئيسية الثلاثة. وتوصف المواد الصلبة التي ينقصها الترتيب المذكور بأنها مادة زجاجية *glassy* أو غير متبلورة *amorphous*. فزجاج النوافذ يكون غير متبلور مثله مثل بعض الزجاج المتكون في الطبيعة خلال ثورة البراكين. وبالتالي فإن كل المواد غير المتبلورة لا تعتبر من المعادن. ولكي يطلق على المادة مصطلح معدن، فإنها يجب أن توجد في الطبيعة. مثل الماسات المستخرجة من مناجم الماس في جنوب إفريقيا. أما الماس المصنع في المعامل فلا يمكن اعتباره من المعادن، مثله مثل آلاف المنتجات الصناعية التي يخلقها الكيميائيون.

ويشترط في المعادن أن تكون من مواد غير عضوية، وذلك يرجع إلى استخدام تاريخي للمصطلح يستبعد

أما معادن صخر الجرانيت فإنها تقدم الدليل على تبلور هذا الصخر في أعماق القشرة الأرضية. ويمكن أن نشاهد الظروف الجيولوجية التي تحدثت في أعماق القشرة الأرضية في مناطق تصادم لوحين قاريين، حيث تؤدي عملية التصادم إلى وجود درجة حرارة قد تصل إلى 700°م وضغط أكثر من 10000 مرة ضعف الضغط الجوي العادي عند سطح الأرض؛ مما يؤدي إلى تكون هذا الصخر في هذا الموضع تحت تلك الظروف. وتعتبر هذه الطريقة في الاستدلال أساسية حين نحاول فهم جيولوجية منطقة ما، وتحديد أنواع الصخور بها ومحاولة الكشف عن موقع غير مكتشف لاسب مهم اقتصاديا مثل بعض خامات الفلزات.

ويعتبر علم المعادن *mineralogy* أحد فروع علم الجيولوجيا، وهو من أهم مصادر الاستدلال الجيولوجي. وهو يتناول دراسة التركيب الكيميائي وبنية وخواص المعادن ومظهرها واستقرارها وأماكن تواجدها، والمعادن الأخرى المصاحبة لها. وسنعرض في هذا الفصل لدراسة المعادن، والتي تعتبر الوحدة البنائية للصخور.

1- تعريف المعدن

يعرف الجيولوجيون المعدن *mineral* بأنه مادة صلبة متبلورة، غير عضوية عامة، لها تركيب كيميائي ثابت أو متغير في مدى محدود، تتواجد في الطبيعة. والمعدن هو الوحدة البنائية للصخور، والتي تتكون من مجموعات متنوعة من المعادن. والمعادن تكون متجانسة، ولا يمكن تقسيمها بالطرق الميكانيكية إلى

السيليكون يكون ثابتاً دائماً. ويستخدم مصطلح مجموعة معدنية **mineral group** لوصف المعدن الذى يحدث فيه إحلال كاتيوني ، دون تغير فى نسبة الكاتيونات إلى الأنيونات .

أشباه المعادن: يوجد فى الطبيعة بعض مركبات صلبة لا ينطبق عليها تعريف المعدن ، لأنه ينقصها التركيب الكيميائى المحدد أو الثابت أو البنية البلورية أو كلاهما. ومن أمثلة ذلك الزجاج الموجود فى الطبيعة والذى يكون تركيبه الكيميائى غير ثابت ومتغير وغير متبلور. ومن أمثلة ذلك أيضا الأوبال ، والذى يكون له تركيب كيميائى ثابت ولكنه غير متبلور. ويطلق مصطلح شبه معدن **mineraloid** لوصف مثل هذه المواد.

II المعادن وتركيبها الكيميائى

يبلغ عدد العناصر المعروفة فى الوقت الحاضر أكثر من مائة عنصر، بينما يبلغ ما تم تحصيله منها إلى الآن نحو 18 عنصراً . وتتكون معظم المعادن من عنصرين أو أكثر تتحد معاً لتكوّن مركباً ثابتاً ، بينما يتكون القليل منها من عنصر واحد فقط مثل : الذهب والماس والجرافيت . وتتحد العناصر مع بعضها لتكوين مركبات ، ولنفهم كيف يتم ذلك فلا بد أن نفهم تركيب الذرة. فالذرة **atom** هى أصغر وحدة فى بناء العنصر وتحفظ بخواصه الفيزيائية والكيميائية. كما أنها أصغر وحدات المادة التى تدخل فى التفاعلات الكيميائية، إلا أن الذرة نفسها يمكن أن تنقسم إلى وحدات أصغر.

المواد العضوية التى تكوّن أجسام النباتات والحيوانات من المعادن ، حيث إن هذه المواد العضوية تكون مكونة من كربون عضوى ، وهو أحد أشكال الكربون الموجود فى كل المواد العضوية. وقد تتحول بقايا النباتات المتحللة إلى الفحم ، الذى هو بالتالى مكون من كربون عضوى . وعلى الرغم من أن هذا الفحم يوجد فى الطبيعة أيضاً ، إلا أن العرف جرى على عدم اعتباره من المعادن. وعلى الجانب الآخر، فهناك عديد من المعادن التى تفرزها الكائنات الحية، والتى تحتوى على كربون غير عضوى ، مثل معدن الكالسيت الذى تفرزه العديد من الكائنات الحية لتكوّن هيكلها وتبنى منه صخور الحجر الجيرى . ويكون الكالسيت فى هذه الحالة غير عضوى ومتبلور، وينطبق عليه تعريف المعدن .

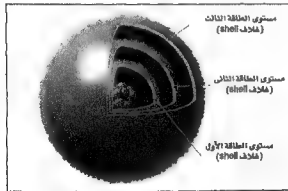
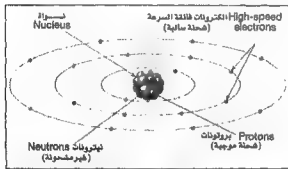
كما يجب أن يكون للمعدن تركيب كيميائى ، قد يكون ثابتاً أو متغيراً فى حدود معينة . بما يعنى استبعاد الزجاج حيث إن له تركيباً غير ثابت ، وكذلك المخاليط التى لا يمكن التعبير عنها بصيغة كيميائية محددة . فالتركيب الكيميائى لمعدن الكوارتز مثلاً عبارة عن ذرتى أكسجين وذرة واحدة من السيليكون. وهذه النسبة ثابتة لا تتغير أبداً ، على الرغم من أن الكوارتز يوجد فى الكثير من الصخور المختلفة التركيب . أما معدن الأوليفين فيتكون من عناصر الحديد والماغنسيوم والسيليكون بنسبة ثابتة أيضاً . وعلى الرغم من أن نسبة ذرات الحديد إلى الماغنسيوم فى هذا المعدن يمكن أن تتغير ، إلا أن مجموع هذه الذرات إلى عدد ذرات

جديدة. وتتكون كل ذرة من نواة **nucleus** تتوسطها وتحتوى على البروتونات **protons** والنيوترونات **neutrons** التى تمثل كامل كتلة النواة. وكتلة البروتون تساوى كتلة النيوترون تقريبا، ولكن تحمل البروتونات شحنات كهربية موجبة (+1) بينما لا تحمل النيوترونات أى شحنة، أى تكون متعادلة الشحنة. وقد تحتوى ذرات العنصر الواحد على عدد مختلف من النيوترونات فى نظائر العنصر المختلفة، بينما يكون عدد البروتونات ثابتا لا يتغير للعنصر الواحد. ويحيط بالنواة سحابة متحركة من الإلكترونات **electrons** لها كتلة متناهية فى الصغر، يمكن إهمال كتلتها، ويحمل الإلكترون شحنة كهربية سالبة واحدة (-1). ويعادل عدد البروتونات فى نواة أى ذرة نفس عدد

ولتتعرف المعادن بصورة واضحة، فإننا يجب أن نفحص أهم خاصيتين للمعادن وهما التركيب **composition** (أى مجموعة العناصر الكيميائية الموجودة بالمعدن وخصائصها) وكذلك البنية البلورية **crystal structure** (أى الطريقة التى يتم بها ترتيب ورص ذرات العناصر الكيميائية فى شكل هندسى منتظم الأبعاد لتكوين المعدن). ونظرا لأن معظم المعادن تحتوى على العديد من العناصر الكيميائية، فإنه من الأفضل أن تبدأ مناقشتنا باستعراض سريع لتركيب الذرات والطريقة التى تتحد بها العناصر الكيميائية لتكوين المركبات.

أ- تركيب الذرات

يتيح فهم تركيب الذرة التنبؤ بكيفية تفاعل العناصر الكيميائية مع بعضها بعضا لتكوين بنىات بلورية



شكل (1.2): نموذجان للذرة

- أ) رسم مبسط جدا للذرة التى تتكون من نواة فى المركز تحتوى على بروتونات ونيوترونات، يحيط بها إلكترونات تلدور بسرعة عالية فى مدارات ثابتة متحدة المركز حول النواة.
- ب) نموذج آخر للذرة يتكون من سحابات من الإلكترونات، التى تنتظم فى أغلفة كروية تحيط بالنواة. ويكون حجم الإلكترونات متناه فى الصغر مقارنة بالبروتونات والنيوترونات، كما أن المسافة النسبية بين النواة وأغلفة الإلكترونات تكون أكبر بكثير مما هو موضح فى الشكل.

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

فنظائر عنصر الكربون التي تحتوى على ستة بروتونات، تحتوى على 6 أو 7 أو 8 نيوتونات ، وبالتالي تكون هناك ثلاث كتل ذرية لهذه النظائر الثلاثة وهى كربون - 12 و 13 و 14 على التوالي (شكل 2.2). ويتواجد العنصر الكيميائى فى الطبيعة كخليط من نظائره المختلفة ، وبالتالي فإن الكتلة الذرية لا يمكن أن تكون رقما صحيحا. فالكتلة الذرية لعنصر الكربون هى 12.011 و هى قريبة من الرقم 12 لأن نظير الكربون - 12 هو الأكثر شيوعا عموما. وتحدد العمليات الجيولوجية نسبة تواجد النظائر المختلفة لعنصر ما على الأرض ، مما يزيد من معدل انتشار بعض النظائر عن النظائر الأخرى. فالكربون-12 مثلاً يفضل به بعض التفاعلات الحيوية مثل البناء الضوئى photosynthesis حيث يتم إنتاج مركبات كربون عضوية من مركبات كربون غير عضوية .

III. التفاعلات الكيميائية

يحدد تركيب الذرة تفاعلاتها الكيميائية مع الذرات الأخرى. فالتفاعلات الكيميائية chemical reactions هى تفاعلات لذرات عنصرين كيميائيين أو أكثر بنسب ثابتة لتنتج مواد كيميائية جديدة هى المركبات الكيميائية. فعندما تتحد ذرتا هيدروجين مع ذرة أكسجين ، يتكون مركب كيميائى جديد اسمه الماء (H₂O) . وقد تختلف خصائص المركب الكيميائى الناتج كلية عن العناصر المكون منها . فمثلا ، عندما تتحد ذرة صوديوم مع ذرة كلور يتكون كلوريد

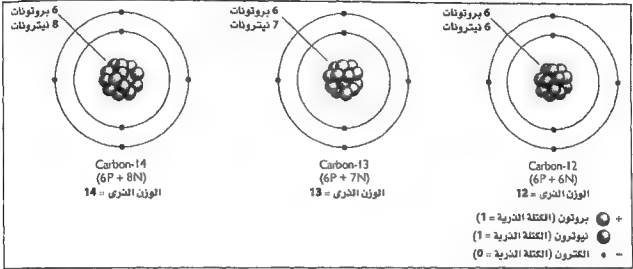
الإلكترونات التى توجد فى السحابة الخارجية حولها، وبذلك تصبح أى ذرة متعادلة كهربيا. وتحدد الأبحاث الحديثة لتركيبة الذرة مواقع الإلكترونات .

وتتنظم الإلكترونات حول النواة فى مدارات orbits ، تكون كأغلفة كروية أو كسحابة من الإلكترونات السالبة الشحنة تحيط بالنواة ، وليس كمدارات ثابتة ، وللتسهيل فإننا نرسم المدارات كدوائر متحدة المركز حول النواة (شكل 1.2).

بـ العدد الذرى والكتلة الذرية

يطلق على عدد البروتونات فى نواة أى ذرة اسم العدد الذرى أو الرقم الذرى atomic number ، وحيث إن كل ذرات العنصر الواحد يكون بها نفس العدد من البروتونات، فإنها يكون لها بالتالى العدد الذرى نفسه. فكل الذرات التى تحتوى على ستة بروتونات هى ذرات عنصر الكربون (العدد الذرى 6) ، وكل الذرات التى تحتوى على ثمانية بروتونات هى ذرات أكسجين وهكذا. ويحتوى كل عنصر على عدد من الإلكترونات مساو لعدد البروتونات فى نواة الذرة . ويحدد العدد الذرى للعنصر طريقة تفاعله كيميائيا مع بقية العناصر .

أما الكتلة الذرية أو الوزن الذرى atomic mass لعنصر ما فهو مجموع كتل البروتونات والنيوترونات الموجود فى نواة تلك الذرة . وقد تحتوى ذرات العنصر الكيميائى نفسها على أعداد مختلفة من النيوترونات، ويكون لها بالتالى كتل ذرية مختلفة ، ويطلق على هذه الأنواع المختلفة من الذرات اسم النظائر isotopes .



شكل (2.2): ثلاثة نظائر لعنصر الكربون، يحتوي كل منها على العدد نفسه من البروتونات، وبالتالي يكون لها العدد الذري نفسه وهو ستة، بينما تختلف الكتلة الذرية لنظائر الكربون لأنها تحتوي على أعداد مختلفة من النيوترونات.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

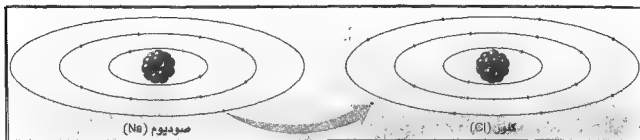
الصوديوم، والمعروف باسم ملح الطعام. ويعبر عن هذا المركب بالصيغة الكيميائية NaCl. وتحدث

التفاعلات الكيميائية بالتفاعل بين الإلكترونات

الموجودة في مداراتها الخارجية. وحيث إن معظم ذرات العناصر تحتوي على عدد من الإلكترونات أقل من الحد الأقصى الذي تسمح به مداراتها، فإن كل الذرات تميل إلى أن تكمل مداراتها الخارجية لتصبح مستقرة كيميائياً مثل الغازات الحاملة كالتيون والأرجون. وتعني قاعدة الثمانية أن octet rule أن تتحد الذرات ببعضها البعض بحيث يناظر تركيب الإلكترونات بها ما هو موجود في أقرب غاز خامل لها، حيث يحتوي المدار الخارجي لها على 8 إلكترونات. لذلك فإن هذه الغازات مستقرة كيميائياً ولا تتفاعل مع بعضها البعض أو مع غيرها من العناصر. ولكن نفهم هذه التفاعلات فإننا نحتاج

أ. اكتساب أو فقد الإلكترونات

تنظم الإلكترونات حول نواة الذرة في مجموعة من الأغلفة المتحدة المركز، والتي تعرف بأغلفة الإلكترونات (المدارات)، حيث يحتوي كل منها على عدد محدد من الإلكترونات. وفي التفاعلات الكيميائية لمعظم العناصر، فإن الإلكترونات الموجودة في الأغلفة shells الخارجية هي التي تدخل في التفاعلات فقط. ففى التفاعل بين الصوديوم (Na) والكلور (Cl) ليكونا ملح الطعام (NaCl)، فإن الصوديوم يفقد إلكترون من الغلاف الخارجي، بينما تكتسب ذرة الكلور هذا الإلكترون في غلافها الخارجي (شكل (3.2).



شكل (3.2): الترابط الكيميائي للصوديوم والكلور ، نتيجة انتقال الإلكترون الوحيد الموجود في الغلاف الخارجي لذرة الصوديوم إلى ذرة الكلور ، مما يؤدي إلى تكوين أيون صوديوم موجب (Na^+) وأيون كلور سالب (Cl^-) . ويرجع الترابط الكيميائي إلى تكوين مركب كلوريد الصوديوم (NaCl) نتيجة للتجاذب الإلكترونياتيكي بين الأيونات الموجبة والسالبة .

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

من أيون كبريت واحد يحمل ست شحنات موجبة (+6) وأربعة أيونات أكسجين يحمل كل منها شحنتين سالبتين لتبقى شحنتان سالبتان ، (-2) .

أغلفة الإلكترونات واستقرار الأيون: تحتوي ذرة الصوديوم على إلكترون واحد في غلافها الخارجي قبل التفاعل مع الكلور ، وعندما تفقد ذرة الصوديوم هذا الإلكترون ، فإنها تفقد بالتالي هذا الغلاف ويصبح الغلاف الذي يليه ، والذي يحتوي على ثمانية إلكترونات هو الغلاف الخارجي (أقصى ما يمكنه أى مدار هو ثمانية إلكترونات) ، وتحتوي ذرة الكلور على سبعة إلكترونات في غلافها الخارجي (قبل التفاعل) مع وجود مكان لإلكترون آخر حتى يصبح عدد الإلكترونات في هذا الغلاف ثمانية إلكترونات . وباكتساب هذا الإلكترون ، فإن الغلاف الخارجي لأيون الكلور يصبح مشبعاً . وتميل معظم العناصر بقوة إلى أن يكون لها غلاف إلكتروني خارجي مشبع .

الأيونات: يؤدي اكتساب أو فقد الذرة لأحد إلكتروناتها الخارجية أن تصبح غير متعادلة كهربياً . فعندما تفقد ذرة الصوديوم إلكتروناتها فإنها تتحول إلى أيون صوديوم يحمل شحنة كهربية موجبة (+1) . ويرمز للأيون بالرمز (Na^+) وعندما تكتسب ذرة الكلور إلكترونات ، فإنها تصبح أيون كلور يحمل شحنة كهربية سالبة واحدة (-) ، ويرمز له بالرمز (Cl^-) . وتسمى الأيونات الموجبة كاتيونات cations مثل أيون الصوديوم ، بينما تسمى الأيونات السالبة أنيونات anions مثل أيون الكلور . أما المركب الكيميائي كلوريد الصوديوم NaCl فإنه يكون متعادلاً كهربياً ، لأن الشحنة الكهربائية على الصوديوم Na^+ تتعادل تماماً مع الشحنة السالبة على الكلور Cl^- . ويتحد عدد من الأيونات ليكون أيونات مركبة complex ions مثل أيون الكبريتات الشائع (SO_4^{2-}) ، وهو أحد مكونات معدن الأنهيدريت (CaSO_4) ، وهو مركب شائع في ماء البحر . وأيون الكبريتات عبارة عن وحدة مكونة

ويتكون معدن الماس من عنصر الكربون فقط. ويكل ذرة كربون أربعة إلكترونات في غلافها الخارجى، وتشارك كل ذرة كربون مع أربع ذرات كربون مجاورة لها (شكل 6.2 أ). وعندما تشارك الإلكترونات، فإن كل الذرات تظهر كما لو أن كل ذرة يدور حولها ثمانية إلكترونات في غلافها الخارجى. ولا يمكن اعتبار هذه الإلكترونات المشاركة اكتسبت أو فقدت. ولا تسمى هذه الذرات بالأيونات، حيث إن الذرات مازالت تمتلك عددها الأصلي من الإلكترونات.

ج- الجدول الدورى للعناصر

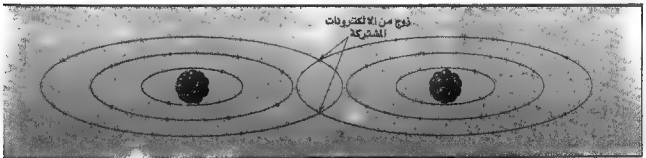
لقد عرف الكيميائيون منذ زمن طويل أن بعض مجموعات العناصر لها الخصائص الكيميائية نفسها، مثل درجة الغليان ودرجة الانصهار والميل للتفاعل كيميائياً مع عناصر أخرى، وتختلف هذه المجموعات

عن طريق فقد أو اكتساب إلكترونات أثناء التفاعلات الكيميائية.

ب- المساهمة في الإلكترونات

لا تتفاعل كل العناصر الكيميائية مع بعضها بعضاً باكتساب أو فقد إلكترونات، وإنما يكون لدى الكثير منها القدرة على الاتحاد مع بعضها بعضاً عن طريق المشاركة في الإلكترونات **electron sharing** مع ذرات العنصر نفسه أو عنصر آخر، للوصول إلى الاستقرار المطلوب للإلكترونات. ويميل عناصر الكربون والسيليكون وهما من أكثر العناصر انتشاراً في القشرة الأرضية، إلى المشاركة في الإلكترونات.

ويوضح شكل (4.2) مساهمة إلكترونين من ذرتي كلور ليكونا جزيئاً من غاز الكلور. وعندما تتداخل المدارات الخارجية للإلكترونات، فإن أحد الإلكترونات السبعة الموجودة في المدار الخارجى لإحدى ذرتي الكلور تكمل المدار الخارجى للذرة المشاركة معها مكونة الثمانية المستقر.



شكل (4.2): شكل يوضح المشاركة في الإلكترونات بين ذرتي كلور ليكونا جزيئاً من الكلور. ويلاحظ أن عملية المشاركة في الإلكترونات تؤدي إلى أن تعمل كل من ذرتي الكلور ثمانية إلكترونات في مدارها الخارجى.

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition, Macmillan Publishing Company, New York).

العناصر التي تميل لفقد الإلكترونات: تتميز كل العناصر الموجودة في العمود الموجود في أقصى يسار الجدول الدوري بوجود إلكترون واحد في مدارها الخارجي ، وتميل بشدة إلى فقد هذا الإلكترون في التفاعلات الكيميائية. ومن هذه المجموعة عناصر الهيدروجين (H) والصوديوم (Na) والبوتاسيوم (K) التي توجد بوفرة كبيرة على سطح الأرض ، وفي قشرتها الخارجية. ويلى هذه المجموعة الرأسية العمود الثانى من اليسار ، والذي يحتوى على عنصرين شائعين أيضا في القشرة الأرضية وهما الماغنسيوم (Mg) والكالسيوم (Ca) . وكل العناصر في هذا العمود يوجد بها إلكترونان في مدارها الخارجي ، وتميل بشدة إلى فقد هذين الإلكترونين أثناء التفاعلات الكيميائية.

العناصر التي تميل لاكتساب الإلكترونات: يشمل العمودان الراسيان يمين الجدول الدوري مجموعة العناصر التي تميل إلى اكتساب الإلكترونات في مداراتها الخارجية ومنها عنصر الأكسجين (O) أكثر العناصر انتشاراً في الأرض ، والفلور (F) وهو غاز ضار بالصحة. فالعناصر الموجودة في العمود الذى يبدأ بعنصر الأكسجين تحتوى على 6 إلكترونات في أغلفتها الخارجية وتميل إلى اكتساب إلكترونين ليتشبع مدارها الخارجى بثمانية إلكترونات . أما العناصر التي توجد في العمود الذى يبدأ بعنصر الفلور فتحتوى على 7 إلكترونات في أغلفتها الخارجية وتميل إلى اكتساب إلكترون واحد.

بوضوح عن بعضها البعض. وحينما أصبح التركيب الذرى للعناصر معروفاً، فقد اتضح أن الخصائص الكيميائية ترجع إلى تركيب أغلفة الإلكترونات لهذه العناصر.

ويرتب الجدول الدوري periodic table (شكل 5.2) العناصر (من اليسار إلى اليمين على امتداد الصف) طبقاً للعدد الذرى (عدد البروتونات) مما يعنى في الوقت نفسه زيادة عدد الإلكترونات في المدار الخارجى للعناصر في الاتجاه نفسه. فمثلاً يبدأ الصف الثالث على اليسار بعنصر الصوديوم (عدده الذرى 11) والذي يحتوى على إلكترون واحد في المدار الخارجى، يليه الماغنسيوم (عدده الذرى 12) ويحتوى على إلكترونين في المدار الخارجى، فالألومنيوم (عدده الذرى 13) ويحتوى على 4 إلكترونات في المدار الخارجى ، فالسيليكون (عدده الذرى 14) ويحتوى على 4 إلكترونات في المدار الخارجى ، فالفسفور (عدده الذرى 15) ويحتوى على 5 إلكترونات في المدار الخارجى ، فالكبريت (عدده الذرى 16) ويحتوى على 6 إلكترونات في المدار الخارجى ، فالكلور (عدده الذرى 17) ويحتوى على 7 إلكترونات في المدار الخارجى. والعنصر الأخير في هذا الصف هو الأرجون (عدده الذرى 18) ويحتوى على 8 إلكترونات في المدار الخارجى ، وهو أقصى عدد ممكن من الإلكترونات في المدار الخارجى. ويكون كل عمود في الجدول الدوري مجموعة رأسية من العناصر ، تتميز بغلاف خارجى من الإلكترونات به عدد الإلكترونات نفسه.

التفلق. وأكثر الروابط الكيميائية شيوعاً في المعادن المكوّنة للصخور الرابطتان الأيونية والتساهمية.

أ- الروابط الأيونية

الرابط الأيونية **ionic bond** هي أبسط أنواع الروابط الكيميائية. وتنشأ هذه الرابطة نتيجة للتجاذب بين الأيونات المتضادة الشحنة مثل أيون الصوديوم الموجب (Na^+) وأيون الكلور السالب (Cl^-) في كلوريد الصوديوم (شكل 3.2). وتقل قوة الرابطة الأيونية كثيراً كلما زادت المسافة بين الأيونات، بينما تزداد قوة الرابطة بزيادة الشحنات الكهربية للأيونات. والروابط الأيونية هي أكثر أنواع الروابط الكيميائية شيوعاً في المعادن، حيث إن نحو 90٪ من المعادن هي في الأصل مركبات أيونية.

ب - الروابط التساهمية

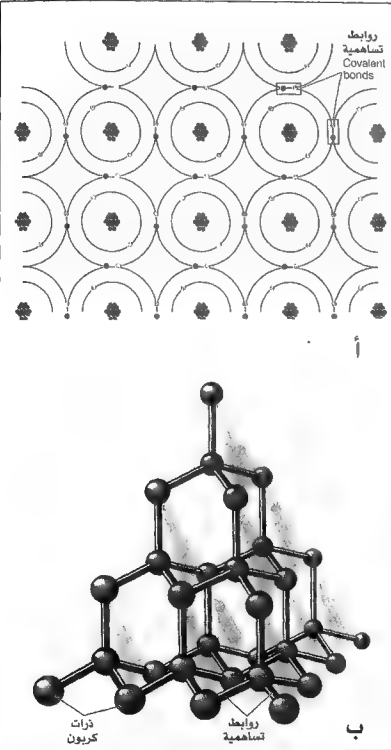
تحدث الروابط التساهمية **covalent bonds** عندما تكوّن العناصر مركبات عن طريق التشارك في بعض إلكترونات مداراتها الخارجية دون أن تفقد أو تكتسب إلكترونات. وبصفة عامة فإن الروابط التساهمية تكون أقوى من الروابط الأيونية. والتركيب البلوري لمعدن الماس الذي يتكون من عنصر الكربون فقط، يتأسسك عن طريق الروابط التساهمية. وكما رأينا سابقاً في معدن الماس، فإن ذرة الكربون يكون بها أربعة إلكترونات في مدارها الخارجي، ويحتاج إلى أربعة إلكترونات أخرى بالمشاركة حتى يصبح المدار الخارجي مشبعاً بثمانية إلكترونات (شكل 16.2). وتكون كل ذرة (وليس أيونا) في معدن الماس محاطة بأربع ذرات أخرى مرتبة على هيئة شكل رباعي الأوجه

العناصر الأخرى: تتميز الأعمدة التي توجد أقصى يسار الجدول الدوري، وتلك التي توجد أقصى يمينه بأن لها ميولاً مختلفة نحو اكتساب أو فقد أو المشاركة في الإلكترونات. فالعمود الموجود في الناحية اليمنى والذي يبدأ بعنصر الكربون (C) يضم عنصر السيليكون (Si) وهو من أكثر العناصر شيوعاً على الأرض. ويميل كل من الكربون والسيليكون، كما لاحظنا سابقاً، إلى المشاركة في الإلكترونات. أما العناصر الموجودة في العمود الأخير أقصى اليمين والذي يبدأ بعنصر الهيليوم (He) فإن أغلفتها الخارجية تكون مشبعة بالإلكترونات ولا تميل لاكتساب أو فقد إلكترونات. ولذلك فإن هذه العناصر على عكس بقية العناصر في بقية الأعمدة لتتفاعل كيميائياً مع العناصر الأخرى إلا تحت ظروف خاصة جداً.

IV الروابط الكيميائية

ترتبط أيونات وذرات العناصر التي تكوّن المركبات الكيميائية المختلفة بقوى كهربية تعمل على جذب الإلكترونات يطلق عليها الروابط الكيميائية **chemical bonds**. وقد يكون هذا التجاذب قوياً أو ضعيفاً نتيجة لاكتساب أو فقد الإلكترونات أو المساهمة فيها. وبالتالي، تكون الروابط الناشئة عن هذا التجاذب قوية أو ضعيفة. وتعمل الروابط الكيميائية القوية على حفظ المادة من التحلل إلى عناصرها الأصلية أو إلى مركبات أخرى. وعلاوة على ذلك، فإن هذه الروابط تجعل المعادن صلبة وتحافظ عليها من التكسر أو

tetrahedron ، وهو هرم مكون من أربعة أوجه ، كل وجه عبارة عن مثلث متساوي الأضلاع (شكل 6.2 ب). وفي هذا الترتيب، فإن كل ذرة كربون تشارك بالكترون مع كل من الذرات الأربعة المجاورة لها . وبذلك تصل إلى حالة الاستقرار، حيث يوجد في



شكل (6.2): الرابطة التساهمية covalent bond في الماس

أ) رسم يوضح كيف تساهم كل ذرة كربون في الماس بأربعة إلكترونات في غلافها الخارجي مع أربع ذرات كربون أخرى بحيث يصبح الغلاف الخارجي في كل الذرات مشبعاً بثمانية إلكترونات .

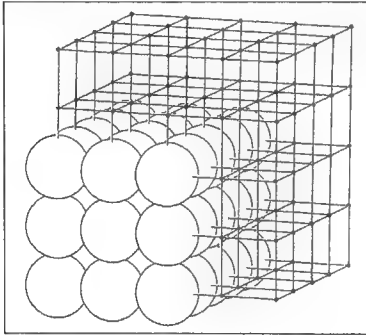
ب) تكون كل ذرة كربون في الماس محاطة بأربع ذرات أخرى مرتبة على هيئة شكل رباعي الأوجه.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

V- التركيب الذرى للمعادن

الذرات مع بعضها البعض، حسب النسب الكيائية الصحيحة والترتيب الذرى المنتظم (علينا أن نتذكر أن ذرات المعدن تكون مرتبة في شبكة بلورية ثلاثية الأبعاد). ويمثل ارتباط ذرات الكربون بعضها ببعض في معدن الماس - وهو معدن يتكون بالرابطة التساهمية - أحد أمثلة التبلور والبناء البلورى . وأثناء نمو بلورة الماس ، فإن بناءها الذرى المكوّن من رباعيات أوجه من ذرات الكربون تمتد في كافة الاتجاهات بإضافة ذرات جديدة باستمرار في الترتيب الهندسى الصحيح (شكل

تمثل المعادن تجمعا من الذرات مرتبة في شبكة بلورية **crystal lattice** في الأبعاد الثلاثة في الفراغ ، ولا ترى حتى بالميكروسكوب العادى (شكل 7.2). وتساعد المناقشة السابقة عن الروابط الكيميائية بين الذرات والأيونات إلى فهم أوضح للأشكال المنتظمة التى تميز التركيب الذرى للمعادن، وكذلك للظروف التى تكونت فيها المعادن. وتسمى المواد الصلبة التى تتميز بالبنية البلورية **crystal structure** بالمواد



شكل (7.2): تتكون البلورات من ذرات مرتبة بانتظام في الأبعاد الثلاثة . فإذا تخيلنا أنه يمكن ربط مراكز تلك الذرات بخيوط ، فإن البلورة تشبه في هذه الحالة شبكة منتظمة في الأبعاد الثلاثة .
تعرف بالشبكة البلورية (**crystal lattice**) .

(6.2) . ومن العلوم أنه يمكن تصنيع الماس تحت ظروف ضغط عال جدا وحرارة شديدة ، والتى تحاكي الظروف في وشاح الأرض.

وأيونات الصوديوم والكلور التى تكوّن كلوريد الصوديوم - وهو معدن يتكون بالرابطة الأيونية - يمكن أن تتبلور أيضا في صفوف منتظمة في الأبعاد الثلاثة . ويوضح شكل (8.2) الترتيب الهندسى

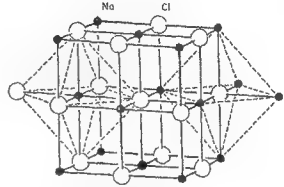
المتبلورة **crystalline materials** . وكما سيتضح في هذا الفصل، فإن البنية البلورية للمعادن تعكس خواصها الطبيعية. هذا وسنناقش أولا طريقة تكوّن المعادن.

أ- طريقة تكوين المعادن

تتكون المعادن بالتبلور **crystallization** ، أى ينمو جزء صلب من مادة، بحيث تتجمع مكوناتها من

والتي قد تكون أعلى من 1000°C ، فإن بلورات المعادن السيليكاية مثل الأوليفين أو الفلسبار تبدأ في التكون . كما أن هناك مجموعة من الظروف التي تؤدي إلى تبلور المعادن أثناء عملية الترسب ، حينها تبدأ السوائل في التبخر من المحاليل . ويتكون المحلول عندما تذاب مادة كيميائية في مادة أخرى ، مثل الملح في الماء . وعندما يبدأ الماء في التبخر من محلول الملح ، فإن تركيز الملح يتزايد حتى يصبح المحلول مشبعاً بالملح - أي لا يستطيع أن يحتفظ بمزيد من الملح . فإذا استمر البخر ، فإن الملح يبدأ في الترسب ؛ بمعنى أن يفصل عن المحلول مكوناً بلورات .

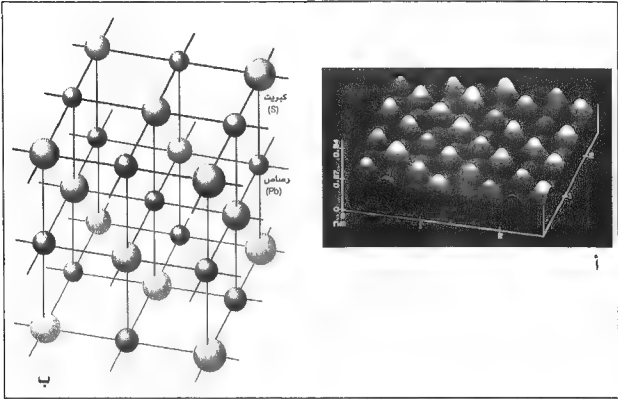
وتبدأ عملية التبلور بتكوين بلورات **crystals** منفردة ميكروسكوبية الحجم . والبلورات أجسام تحدها أسطح مستوية تكونت بفعل الطبيعة (أي ليست صناعية) تعرف بأوجه البلورة **crystal faces** . والوجه البلوري في المعدن هو انعكاس وتعبير خارجي عن البناء الذري الداخلي للمعدن . وتنمو البلورات الميكروسكوبية أثناء عملية التبلور ، وتكون محتفظة بالأوجه البلورية المميزة لها ، طالما أنه يمكنها النمو بحرية دون عوائق . وتتكون البلورات الكبيرة الحجم ، ذات الأوجه البلورية المحددة عندما يكون النمو بطيئاً وبهدوء ، وتتواجد في حيز يسمح لها بالنمو دون تدخل مع البلورات الأخرى القريبة منها (شكل 10.2 أ) . ولهذا السبب ، فإن معظم البلورات الكبيرة الحجم (شكل 10.2 ب) تتكون في الفراغات الواسعة في ثنایا الصخور ، مثل الكسور المفتوحة أو الكهوف .



شكل (8.2): تركيب كلوريد الصوديوم ، حيث تمثل الخطوط المقطعة ترتيب كل من أيونات الصوديوم والكلوريد في شكل ثنائي الأوجه .

لأيونات كلوريد الصوديوم ، حيث يحاط كل أيون بستة أيونات من النوع الآخر في سلسلة من ثنائيات الأوجه متحدة في الأبعاد الثلاثة . ويكون حجم الذرات والأيونات متناهيًا في الصغر ، حيث يكون معظمها في حدود عدة عشرات من المليون من السنتيمتر ، بحيث لا نستطيع أن نرى الترتيب البلوري لمعدن ما حتى باستخدام الميكروسكوبات ذات قوة التكبير العالية . إلا إنه يمكننا الآن أن نصور الترتيب الذري للبلورات باستخدام الميكروسكوب الإلكتروني ذي قوة التكبير العالية (شكل 9.2) .

وتبدأ عملية التبلور عندما تنخفض درجة حرارة السائل إلى درجة أقل من درجة تجمد السائل **freezing point** . وفي حالة الماء فإن درجة الصفر هي الدرجة التي تبدأ تحتها بلورات الثلج (وهو معدن) في التبلور . وبالمثل عندما تبرد الصهارة **magma** وهي مادة صخرية منصهرة (ساخنة وسائل) ، تبدأ المعادن الصلبة في التبلور منها . فعندما تنخفض درجة حرارة الصهارة تحت درجة الانصهار **melting point** ،

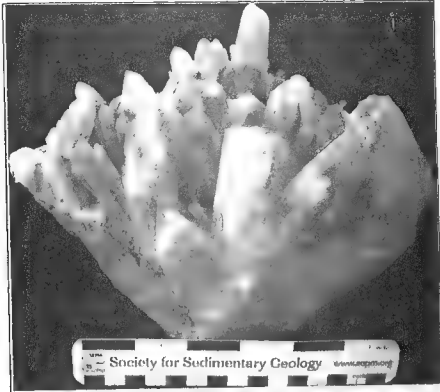


شكل (9.2): رؤية الذرات في المعادن ، ترتيب ذرات الرصاص (Pb) والكبريت (S) في معدن الجالينا PbS وهو أكثر معادن الرصاص انتشاراً . تكون الرابطة بين الرصاص والكبريت أيونية ، حيث يتكوّن الرصاص كاتيون رصاص (Pb^{2+}) ، بينما يتكوّن الكبريت أنيون كبريت (S^{2-}) ، ولتتبادل الشحنات فلا بد من وجود عدد من ذرات الرصاص مساو لعدد ذرات الكبريت . وتكون الذرات صغيرة الحجم لدرجة أن مكعباً من الجالينا يبلغ طول حرفه 1 سم يحوى على 10^{22} ذرة من كل من الرصاص والكبريت .

(أ) الذرات على سطح بلورة الجالينا كما ترى بالميكروسكوب الإلكتروني ، وتبدو ذرات الكبريت أكبر حجماً من ذرات الرصاص .
(ب) طريقة تعبئة الذرات في بلورة الجالينا .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition, John Wiley and Sons, Inc., New York).

وفي الغالب ، فإن الفراغات بين البلورات النامية تكون ممتلئة أو أن عملية التبلور تتم بسرعة ، ولذلك تنمو أوجه البلورة حيث تزد وتتداخل مع بعضها البعض وتلتحم البلورات سابقة التكوين لتكوّن كتلة صلبة من الجسيمات المتبلورة . وفي هذه الكتلة المتبلورة ، فإن عدداً قليلاً من الحبيبات يمكن أن تكون بعض الأوجه ، أو قد تكون الحبيبات المتبلورة عديمة الأوجه تماماً . أما المواد غير المتبلورة amorphous materials (مشتقة من اليونانية بمعنى دون شكل) والتي تعرف أيضاً بالمواد الزجاجية glassy materials فهي المواد التي تصلب بسرعة من



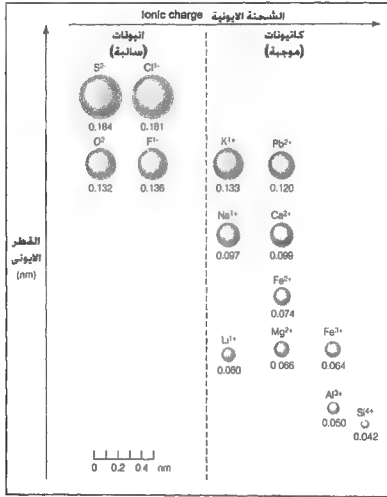
شكل (10.2): نماذج لنمو بلورات كواتز كبيرة الحجم .

- (أ) بلورات كواتز كبيرة الحجم ذات أوجه بلورية محددة تدل على التبلور والنمو ببطء ويهدوء في حيز يسمح لها بالنمو : وادي جرف ، الصحراء الشرقية - مصر . (مجموعة أ.د. محمود فوزي الرمل متحف الجيولوجيا - جامعة الأزهر) .
- (ب) بلورة كواتز كبيرة الحجم تكونت في فراغ واسع ، الصحراء الشرقية - مصر . (مجموعة أ.د. يوسف الششتاوي ، متحف قسم الجيولوجيا - جامعة الأزهر) .

السوائل (الصخور المنصهرة) بحيث لا يكون بها أى نظام تبلور داخلى . وعلى العكس ، فإنها توجد على هيئة كتل لها أسطح غير مستوية ذات مكرس محارى (أسطح مستوية ومنحنية). ومعظم الزجاج الشائع هو زجاج بركانى تكوّن أثناء النشاط البركانى.

ب. الإحلال الأيونى

يوضح شكل (8.2) الأحجام النسبية للأيونات فى كلوريد الصوديوم NaCl ، ويتضح منه أنه توجد ستة أيونات متجاورة فى الوحدة البنائية الأساسية لكلوريد الصوديوم NaCl . وتسمح الأحجام النسبية للأيونات الصوديوم والكلوريد أن تتراس فى ترتيب متقارب .



شكل (11.2): الأحجام المختلفة للأيونات

تتراوح أقطار بعض الأيونات المهمة بين السيلكون Si^{4+} عند يمين الصف السفلى والكبريت S^{2-} عند يسار الصف العلوى . ويلاحظ أن أقطار الأيونات تميل لأن تكون أكبر من الكاتيونات ، كما تكون أحجام الأيونات فى كل زوج من Si^{4+} ، Al^{3+} ، Mg^{2+} ، Fe^{2+} و Na^{1+} ، Ca^{2+} متقاربة وتحمل على بعضها بعضا فى البنية البلورية . أقطار الأيونات مقاسة بالنانومتر (nm) .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

فها يجلان عل بعضها بعضا بسهولة فى البنية البلورية لمعادن الأوليفين . فتركيب الأوليفين الماغنيسيومى النقى Mg_2SiO_4 يعرف بالفورشريت بينما الأوليفين الحديدى النقى Fe_2SiO_4 يعرف بالفايالايت . ويمكن توضيح تركيب معدن الأوليفين المحتوى على كل من الحديد والماغنسيوم بالصيغة التالية $(MgFe)_2SiO_4$ والى تعنى ببساطة أن عدد كاتيونات الحديد والماغنسيوم يمكن أن تتغير ، إلا أن مجموعهما (والمشار إليه بالعدد السفلى 2) لا يتغير بالنسبة لكل أيون سيليكات $(SiO_4)^{4-}$. وتتحدد نسبة الحديد إلى الماغنسيوم بناء على التواجد النسبى للعنصرين فى الصهارة التى يتبلور منها معدن الأوليفين . وفى كثير من معادن السيليكات يحمل الألومنيوم (Al) محل السيليكون (Si) حيث إن أيونى الألومنيوم والسيليكون متشابهان فى الحجم ، بحيث يحمل الألومنيوم محل السيليكون فى عديد من البنيات البلورية . ويتم معادلة الفرق فى الشحنات بين الألومنيوم (+3) والسيليكون (+4) عن طريق زيادة أحد الكاتيونات الأخرى ، مثل كاتيون الصوديوم (+1).

2. التعدد الشكلى: بنيات بلورية مختلفة وتركيب كيميائى واحد

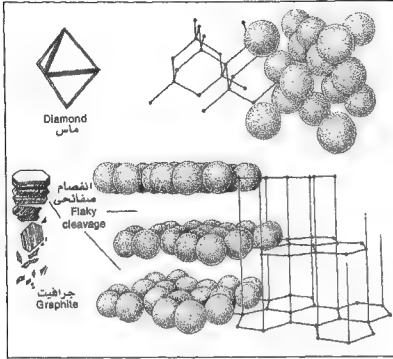
من المعروف أن لكل معدن بنية بلورية داخلية مميزة . إلا أنه قد تكون للمادة الكيميائية الواحدة أكثر من بنية بلورية ، وبالتالى أكثر من نوع من المعادن للمادة

ويتناسب حجم الأيون مع التركيب الذرى للعناصر (شكل 11.2) . ويزداد حجم الأيونات مع زيادة عدد الإلكترونات وأغلفة الإلكترونات . كما تؤثر شحنة الأيون على حجمه أيضا . وكلما زاد عدد الإلكترونات التى يفقدها العنصر ليصبح كاتيون ، زادت شحمته الموجبة وزادت قوة الجذب الكهربى بين نواته وبين الإلكترونات المتبقية . وتكون معظم كاتيونات المعادن الشائعة صغيرة نسبيا ، بينما تكون معظم الأنيونات كبيرة ، ومثال ذلك أنيون الأكسجين ، وهو الأكثر انتشارا فى الأرض . وبما أن الأنيونات تكون أكبر من الكاتيونات ، فإن معظم فراغ البلورة تشغله الأنيونات ، بينما تتوزع الكاتيونات فى الفراغات الموجودة بينها . ونتيجة لذلك ، تتحدد البنيات البلورية اعتمادا على الطريقة التى تترتب بها الأنيونات ، وطريقة وضع الكاتيونات بينها .

الإحلال الكاتيونى: بنية بلورية واحدة وتركيب كيميائية مختلفة

تستطيع الكاتيونات المتماثلة فى الحجم والشحنة أن تحل محل بعضها البعض ، وأن تكون مركبات لها البنية البلورية نفسها ، ولكن بتركيب كيميائى مختلف . ويشيع الإحلال الأيونى ionic substitution فى

المعادن السيليكاتية ، والى تتحد فيها الكاتيونات مع أيون السيليكات $(SiO_4)^{4-}$. ويوضح معدن الأوليفين هذه العملية ، وهو معدن شائع فى الصخور البركانية . فأنيونات الحديد (Fe) والماغنسيوم (Mg) تكون متشابهة فى الحجم ويحملان شحنتين موجبتين ، ولذلك



شكل (12.2): ظاهرة التعدد الشكلي polymorphism . يتميز معنا الماس والجرافيت بظاهرة التعدد الشكلي ، حيث إنهما يتكونان من عنصر الكربون ولهما بنية مختلفة تماماً ؛ فالروابط الكيميائية في الماس في الأبعاد الثلاثة تجعل هذا المعدن صلباً للغاية ومتيناً ، بينما تكون الروابط الكيميائية الأساسية في معدن الجرافيت في بعدين اثنين فقط مما يجعل المعدن صفائحاً وليناً .

(After Gilluly, J., Waters, A.C. and Woodford, A.O., 1975: Principles of Geology, 4th ed., W.H.Freeman and Company).

الماس على أن تكون متقاربة الكثافة . وبالتالي فإن للماس كثافة عالية جداً وتبلغ 3.5 جم/سم³ ، وهي بالطبع أكبر من تلك التي تميز الجرافيت والتي تبلغ 2.1 جم/سم³ . ويتكون الجرافيت ويبقى مستقرًا عند درجات حرارة وضغط متوسط ، مثل ذلك الذي يوجد في القشرة الأرضية . ويوضح جدول (1.2) بعض المعادن المتعددة الشكل الشائعة .

VI - المعادن المكونة للصخور

صُنفت المعادن طبقاً لتركيبها الكيميائي إلى ثمانى مجموعات . فبعض المعادن مثل النحاس تتواجد في الطبيعة كعناصر نقية غير متآينة، تعرف بالمعادن العنصرية native elements . أما معظم المعادن فإنها تصنف تبعاً لنوع الأنيون المكوّن لها . فالأوليغين يصنف كسيليكات طبقاً لأنيون السيليكات $(SiO_4)^{4-}$.

الكيميائية نفسها . ويطلق على هذه البنيات البلورية المختلفة للتركيب الكيميائي نفسه اسم متعددة الشكل polymorphs . ويعتمد تكون البنية البلورية على الظروف المحيطة بالمادة أثناء تبلورها من الضغط ودرجة الحرارة ، وبالتالي على العمق الذي توجد عنده المادة أثناء تبلورها تحت سطح الأرض . فالماس والجرافيت (المادة المستخدمة في أقلام الرصاص) معدنان يتميزان بظاهرة التعدد الشكلي

polymorphism ، حيث إنهما يتكونان من عنصر الكربون ، ولهما بنية بلورية مختلفة ومظهر مختلف تماماً (شكل 12.2) . فالماس يتبلور في فصيلة المكعب بينما يتبلور الجرافيت في فصيلة السداسي . وتدل التجارب والملاحظات الجيولوجية أن الماس يتكون ويبقى مستقرًا عند درجات الحرارة والضغط العالية للغاية الموجودة في الوشاح . حيث يجبر الضغط العالي في الوشاح ذرات

وعلى الرغم من هذا العدد الكبير من المعادن ، فإن الشائع منها فقط حوالى 30 معدنا تمثل الوحدات البنائية لمعظم صخور القشرة الأرضية ، ولذلك فإنها تسمى المعادن المكوّنة للصخور rock-forming minerals. وهذه تتواجد بوفرة فى القشرة الأرضية . حيث يتكون نحو 99٪ من القشرة الأرضية من اثنى عشر عنصرا فقط بكميات تزيد نحو 0.1 ٪. وتعرف تلك العناصر بالعناصر الرئيسية **major elements** (جدول 2.2) . وهكذا تتكون القشرة الأرضية من عدد محدود من المعادن ، التى تتكون من واحد أو أكثر من تلك العناصر الاثنى عشر الشائعة.

ولا تتواجد العناصر الشحيحة **trace elements** وهى العناصر التى تتواجد بكميات أقل من 0.1 فى القشرة الأرضية كمعادن مستقلة ، وإنما تميل إلى أن تتواجد فى المعادن المكونة للقشرة الأرضية بالإحلال الأيونى . فعلى سبيل المثال ، يحتوى معدن الأوليفين $\text{SiO}_4(\text{Mg,Fe})_2$ بالإضافة إلى عناصر الماغنسيوم والحديد والسيليكون والأكسجين ، وهى العناصر الرئيسية فى ذلك المعدن، على كميات قليلة من النحاس والنيكل والكاديوم والمنجنيز ، بالإضافة لعدد من العناصر الأخرى نتيجة الإحلال الأيونى للماغنسيوم والحديد. ونناقش فيما يلى أكثر المعادن المكوّنة للصخور شيوعاً:

جدول (1.2) خواص بعض المعادن الشائعة متعددة الشكل

اسم المعدن	الفصلية البلورية	التركيب
جرافيت	السداسى	C
الماس	المكعب	
كالسيت	الثلاثى	CaCO_3
أراجونيت	المعنى القائم	
بيريت	المكعب	FeS_2
ماركزيت	المعنى القائم	
كوارتز	الثلاثى	SiO_2
كريستوباليت	الرابعى	
تريديميت	المعنى القائم	
أرثوكلز	الميل الواحد	KAlSi_3O_8
الميكروكلين	الميل الثلاثة	
سانيدين	الميل الواحد	

ويصنف معدن الهاليت NaCl والسيلفيت KCl كهاليدات طبقاً لأنيون الكلوريد Cl^- ، والكالسيت طبقاً لأنيون الكربونات $(\text{CO}_3)^{2-}$.

ولقد تمكن العلماء من تعريف حوالى 3500 معدن حتى الآن . وتوجد معظم هذه المعادن فى القشرة الأرضية ، بالإضافة إلى عدد قليل من المعادن التى أمكن تعرفها فى صخور النيازك . كما أمكن اكتشاف معدنين جديدين فى صخور القمر .

د - الكبريتيدات **sulfides** وهى مركبات لأيون

الكبريتيد S^{2-} وكاتيونات فلزية ، مثل معدن البيريت FeS_2 .

هـ - الكبريتات **sulfates** وهى مركبات لأيون الكبريتات $(SO_4)^{-}$ وكاتيونات فلزية ، وتضم معدن الأنهدريت $CaSO_4$.

أما باقى المجموعات الكيميائية من المعادن ، والتي تشمل المعادن العنصرية والهاليدات والفوسفات ، فإنها لا تتواجد بدرجة تواجد المعادن المكونة للصخور. ونتناول هنا بشئ من التفصيل كل من هذه المجموعات :

أ - السيليكات

يعتبر أيون السيليكات $(SiO_4)^{4-}$ هو الوحدة الأساسية المكونة لبنية كل معادن السيليكات. ويتكون أيون السيليكات من أربعة أيونات أكسجين (O^{2-}) تشارك في الإلكترونات مع أيون السيليكون (Si^{4+}) الأصفر حجما ، والذي يقع في الفراغ بين أيونات الأكسجين (شكل 13.2) .

ويؤدى هذا الترتيب لتكوين شكل هرمى مكون من أربعة أوجه ، لتكوّن ما يسمى برباعى الأوجه tetrahedron ، وكل وجه في هذا الشكل الهرمى يتكون من مثلث متساوى الأضلاع (شكل 13.2) . ويكون كل ركن من أركان رباعى الأوجه مركزا للذرة أكسجين . ورباعى الأوجه للسيليكون والأكسجين عبارة عن أنيون يحمل أربع شحنات سالبة تتعادل

جدول (2.2) العناصر الأكثر انتشارا في القشرة الأرضية

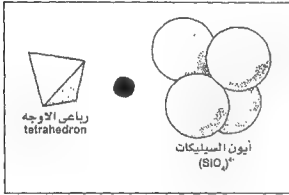
العنصر	النسبة المئوية بالوزن
الأكسجين (O)	45.2
السيليكون (Si)	27.2
الألومنيوم (Al)	8.0
الحديد (Fe)	5.8
الكالسيوم (Ca)	5.06
الماغنسيوم (Mg)	2.77
الصوديوم (Na)	2.32
البوتاسيوم (K)	1.68
التيتانيوم (Ti)	0.86
الهيدروجين (H)	0.14
المنجنيز (Mn)	0.10
الفوسفور (P)	0.10
كل العناصر الأخرى	0.77
المجموع	100.00

أ - السيليكات **silicates** وهى أكثر المعادن شيوعا في القشرة الأرضية ، وتتكون من الأكسجين (O) والسيليكون (Si) ، وهما أكثر العناصر انتشارا في القشرة الأرضية - وتكون متحدة مع كاتيونات عناصر أخرى .

ب - الكربونات **carbonates** وهى معادن مكونة من الكربون والأكسجين في هيئة أيون الكربونات $(CO_3)^{2-}$ متحدة مع الكالسيوم والماغنسيوم مثل معدن الكالسيت $CaCO_3$.

ج - الأكاسيد **oxides** وهى مجموعة من مركبات الأكسجين والكاتيونات الفلزية مثل معدن الهيماتيت Fe_2O_3 .

تكون 1:3 . أما في السيليكات الهيكلية (الإطارية) فإن هذه النسبة تكون 1:2 . وبالتالي ، فكلما زاد عدد ذرات الأكسجين زادت نسبة السيليكون في التركيب . ولذلك توصف معادن السيليكات بأنها عالية أو منخفضة في محتوى السيليكا اعتماداً على نسبة الأكسجين إلى السيليكون . وفيما يلي وصف مختصر لكل من هذه الأنواع من رباعيات الأوجه الأخرى .







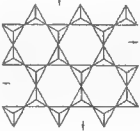

شكل (13.2): رباعي الأوجه tetrahedron وأيون السيليكات (SiO₄)⁴⁻ يتكون أيون السيليكات من أربعة أيونات أكسجين O²⁻ وأيون سيليكون Si⁴⁺ أصغر حجماً يتواجد في الفراغ بين أيونات الأكسجين . تعبر النقطة السوداء عن ذرة السيليكون مقارنة مع ذرات الأكسجين الأكبر حجماً .
(After Hatch, F.H., Wells, A.K. and Wells, M.K., 1972: Petrology of the Igneous Rocks. 13th edition. Thomas Murby & Co., London)

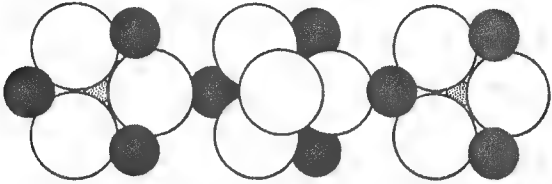
رباعيات الأوجه المفردة: ترتبط رباعيات الأوجه المفردة isolated tetrahedra بالكاتيونات، حيث يرتبط كل أيون أكسجين في رباعي الأوجه بكاتيون (شكل 15.2). وترتبط الكاتيونات بدورها بأيونات الأكسجين في رباعيات الأوجه الأخرى . وهكذا تعزل الكاتيونات رباعيات الأوجه عن بعضها البعض من كل الجهات . والأوليفين هو أحد المعادن المكوّنة للصخور المكوّنة من رباعيات الأوجه المفردة .

ويتكون الأوليفين عند درجات حرارة عالية، ويكون لونه أسود إلى أخضر زيتوني ، وله بريق زجاجي ومكسر محاري . ويتكون من بلورات صغيرة

وتتكون كل معادن السيليكات من رباعيات الأوجه للسيليكون والأكسجين كوحيدات أساسية مرتبطة بالطريقتين السابقتين . وقد تكون رباعيات الأوجه مفردة أو مرتبطة في حلقات أو في سلاسل مفردة أو في سلاسل مزدوجة أو في هيئة صفائح أو على هيئة سيليكات هيكلية (إطارية) ، كما هو موضح في شكل (14.2 و 17.2) . وجدير بالذكر أن نسبة ذرات الأكسجين إلى ذرات السيليكون تختلف في بنيات السيليكات المختلفة . ففي رباعيات الأوجه المفردة توجد 4 ذرات أكسجين لكل ذرة سيليكون . أما في السلسلة المفردة فإن نسبة الأكسجين إلى السيليكون

شكل (14.2) : بنىات السيليكات الرئيسية

ترتيب رباعيات الأوجه	المعدن المثال	التركيب الكيميائي
رباعيات الأوجه المفردة Isolated tetrahedron . لا يشارك الأكسجين بين رباعيات الأوجه، وترتبط رباعيات الأوجه المنفردة بكاتيونات ترتبط بأيونات الأكسجين في رباعيات الأوجه	الأوليبيس 	سيليكات الماغسيوم - الحديد (Mg, Fe) ₂ SiO ₄
حلقات من رباعيات الأوجه Rings of tetrahedra: ترتبط أيونات الأكسجين في كل رباعي أوجه مع رباعيات الأوجه المجاورة لها مكونة حلقات من ثلاث أو أربع أو ست رباعيات أوجه مغلقة	الكورديريت 	سيليكات الماغسيوم - الحديد - الألومنيوم Al ₂ (Mg, Fe) ₂ Si ₄ AlO ₁₀
سلاسل مفردة Single chains: يرتبط كل رباعي أوجه مع اثنين آخرين من طريق مشاركة الأكسجين، وترتبط السلاسل المفردة مع السلاسل المجاورة بواسطة الكاتيونات.	البيروكسين (تستاتيت) 	سيليكات الماغسيوم - الحديد (Fe, Mg)SiO ₃
سلاسل مزدوجة Double chains: ترتبط سلسلتان متوازيتان من سلاسل البيروكسين بالتشارك في أيونات الأكسجين، وترتبط الكاتيونات للسلاسل المزدوجة المتجاورة معا.	الأمفيبول (هورنبلند) 	سيليكات الكالسيوم - الماغسيوم - الحديد Ca(Mg, Fe) ₄ Al(Si ₇ Al) ₂ O ₂₂ (OH, F)
صفائح Sheets: يرتبط كل رباعي أوجه مع ثلاث رباعيات أوجه مجاورة من طريق مشاركة الأكسجين، وترتبط الصفائح بالكاتيونات.	كاولينيت، ميك (مسكونيت) 	سيليكات الألومنيوم Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ سيليكات البوتاسيوم - الألومنيوم KA ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₂
ترابط إطارى Frameworks: تشارك جميع أيونات الأكسجين في كل رباعي أوجه مع رباعيات أوجه أخرى لتكون بنية هيكلياً يمتد في الأبعاد الثلاثة.	الفلسبارات (أورثوكليز) الكوارتز 	سيليكات البوتاسيوم - الألومنيوم KA ₂ Si ₂ O ₆ أكسيد سيليكون SiO ₂



شكل (15.2): التركيب الذري للأوليفين . ويوضح الشكل رباعيات الأوجه والكاتيونات المصاحبة لأيونات الحديد والمغنسيوم موضحة باللون الأسود، بينما أيونات السيليكون موضحة بالنقط .

(After Hatch, F.H., Wells, A.K. and Wells, M.K., 1972: Petrology of the Igneous Rocks, 13th edition, Thomas Murby & Co., London)

التي شاهدها في مجموعة الأوليفين . والصيغة العامة لهذه المجموعة هي $A_3B_2 (SiO_4)_3$ ، حيث يرمز الحرف (A) للكاتيونات ثنائية التكافؤ مثل : المغنسيوم (Mg^{2+}) أو الحديدوز (Fe^{2+}) أو الكالسيوم (Ca^{2+}) أو المنجنيز (Mn^{2+}) أو أى خليط من تلك الكاتيونات. بينما يرمز الحرف (B) للكاتيونات ثلاثية التكافؤ مثل : الألومنيوم (Al^{3+}) أو الحديديك (Fe^{3+}) أو الكروم (Cr^{3+}) أو خليط منها. ويوجد الجارنت في الصخور المتحولة الموجودة في القشرة القارية ، كما قد توجد بلورات كبيرة وجميلة منه في صخور الجرانيت أحيانا (شكل 16.2) . ويتميز الجارنت كذلك بصلادته العالية ، ولذلك يستخدم في أحجار الطحن والتلميع وأقراص تقطيع الصخور .

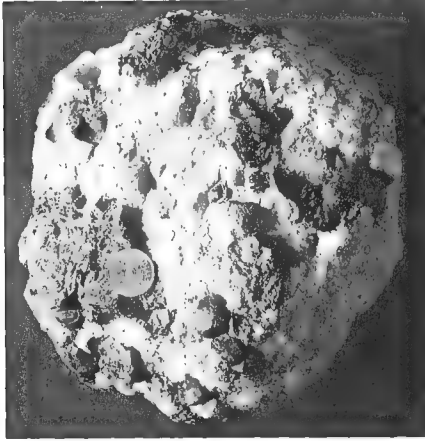
الترابط الحلقي: تتكون حلقات رباعيات الأوجه rings of tetrahedra عندما ترتبط أيونات الأكسجين في كل رباعي أوجه مع رباعيات الأوجه المجاورة لها مكونة حلقات مغلقة (شكل 17.2 ب) . حيث يشارك في هذه الحلقات أيونى أكسجين من كل

حبيبية المظهر عادة . ويتكون الأوليفين من مجموعة من المعادن ، ولذا فإنه يقدم نموذجا بسيطا على الطريقة التي يتغير فيها التركيب بين طرفي سلسلة متصلة . وكما ذكرنا سابقا ، فإننا نستخدم مصطلح مجموعة معدنية mineral group لوصف المعدن الذى يحدث فيه إحلال كاتيوني دون تغير في نسبة الكاتيونات إلى الأنيونات . ويمثل معدنا الفورشتريت Mg_2SiO_4 والفياليت Fe_2SiO_4 طرفي السلسلة ، حيث يحدث إحلال للحديد Fe^{2+} أو المغنسيوم Mg^{2+} محل بعضها في البنية البلورية للمعدن، وتغير نسبة الحديد إلى المغنسيوم نتيجة لذلك من 100 إلى صفر ومن صفر إلى 100 ، وتتكون نتيجة لذلك مجموعة معادن الأوليفين olivine group .

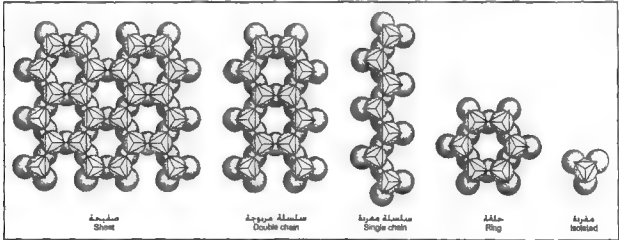
ومن المجموعات المعدنية المهمة التى تتميز باحتوائها على رباعيات الأوجه السيليكاتية المفردة مجموعة معادن الجارنت ، والتى يؤدى الإحلال الكاتيوني فيها إلى تكوين مركبات أكثر تنوعا من تلك

المعادن : الوحدة البنائية للصخور

رباعي أوجه مع رباعيات الأوجه الأخرى (رباعي بعضها البعض . ويتميز معدن الكورديريت الشائع في الصخور المتحولة بهذه البنية البلورية .
أوجه واحد على كل جانب) . وقد ترتبط في هذه الحلقات ثلاثة أو أربعة أو ستة رباعيات أوجه مع
ترابط السلاسل المفردة: تتكون السلاسل المفردة



شكل (16.2). بلورات جازنت كبيرة الحجم في صخور الحرائث بمنطقة وادي حوضين بجنوب الصحراء الشرقية بمصر . (أ.د إبراهيم أبو الليل على ، متحف قسم الجيولوجيا - جامعة الأزهر).



شكل (17.2): البنيات البلورية لمعادن السيليكات ، والتي يمكن تصنيفها طبقاً لطريقة ارتباط رباعيات الأوجه .

(After Press, F. and Siever R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition, W. H. Freeman and Company.

(Al^{3+})، ويكون لون معدن المورنبلند أخضر داكن إلى أسود عادة . ويشبه معدن المورنبلند معدن الأوجيت في الشكل ، إلا أن معدن المورنبلند يتميز بتكوين بلورات مستطيلة تتقاطع فيها مستويات الانقسام عند نحو 56° و 124° ، بينما تبدو بلورات معدن الأوجيت كتلية الشكل وتكون مستويات انقسام متعامدة تقريبا على بعضها البعض .

الترابط الصفائحي

تتكون البنية الصفائحية عندما تتشارك ثلاثة أيونات أكسجين من كل رباعي أوجه مع رباعيات الأوجه المجاورة لها لتتكون صفائح متراسة sheets من رباعيات الأوجه فوق بعضها البعض (شكل 17.2 هو 18.2 أ و ب) ، بينما تتواجد الكاتيونات كطبقة فاصلة بين تلك الصفائح المتراسة . ومعادن مجموعة الميكا mica group ومجموعة المعادن السيليكاتية clay mineral group هي أكثر المعادن السيليكاتية الصفائحية انتشارا . وتختلف مجموعة معادن الميكا عن مجموعات معادن السيليكات السابقة ، في أن مجموعة معادن الميكا تضم عناصر قلوية (بوتاسيوم أو صوديوم أو ليثيوم)، بالإضافة إلى عدم وجود عنصر الكالسيوم . ويتواجد معدن المسكوفيت muscovite $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$ في عديد من الصخور، حيث يمثل أحد أكثر معادن السيليكات الصفائحية انتشاراً . ويمكن فصل المعدن في صفائح رقيقة للغاية وشفافة . ومعدن البيوتيت biotite هو أحد معادن الميكا الغنية بالحديد ، حيث يتميز أيضا بمظهره الأسود اللامع . وهي الصفة التي تميزه عن بقية المعادن الجليدومغنيسية الداكنة اللون . ومعدن البيوتيت مثل معدن المورنبلند

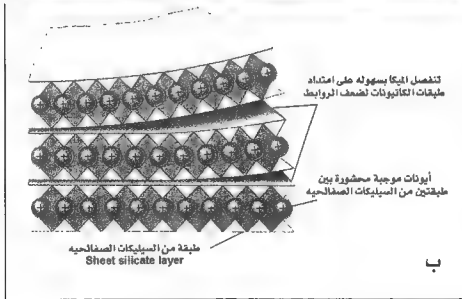
single chains عن طريق المشاركة في أيونات الأكسجين . حيث يرتبط أيونان من الأكسجين من كل رباعي أوجه مع رباعيات الأوجه المجاورة لها ، في هيئة سلاسل مفتوحة (شكل 17.2 ج) . وترتبط السلاسل المفردة مع السلاسل الأخرى المجاورة لها بواسطة الكاتيونات . وتتكون معادن مجموعة البيروكسين pyroxene group بهذه الطريقة . فمثلا، يتكون معدن الإنستاتيت (أحد معادن مجموعة البيروكسين) من أيونات الحديد أو الماغنسيوم أو كليهما، والتي ترتبط معا في سلسلة من رباعيات الأوجه يحل فيها الحديد والماغنسيوم محل بعضهما البعض، كما هو الحال في مجموعة معادن الأوليفين . ويعبر عن بنية هذا المعدن بالصيغة الكيميائية $(MgFe)SiO_3$. ومن أشهر أمثلة معادن البيروكسين معدن الأوجيت $Ca(MgFeAl)Si_2O_6$.

ترابط السلاسل المزدوجة: قد ترتابط سلسلتان مفردتان من سلاسل البيروكسين ليكونا سلسلة واحدة مزدوجة double chain نتيجة للمشاركة في أيونات الأكسجين ، (شكل 17.2 د) . وترتبط السلاسل المزدوجة المتجاورة معا بواسطة الكاتيونات ، لتتكون مجموعة معادن الأمفيبول amphibole group ، والتي تتميز بوجود مجموعة الهيدروكسيل (OH) . ومعدن المورنبلند هو أحد معادن الأمفيبول الشائعة في كل من الصخور النارية والمتحولة . وتركيب معدن المورنبلند معقد للغاية ، حيث يحتوى على أيونات الكالسيوم (Ca^{2+}) والصوديوم (Na^{+}) والماغنسيوم (Mg^{2+}) والحديدوز (Fe^{2+}) والألومنيوم

المعادن : الوحدة البنائية للصخور

الطين ومواد أخرى. وبلورات معادن الطين ميكروسكوبية ، ويتم تعرفها فقط باستخدام الميكروسكوب الإلكتروني. وتتميز معظم معادن الطين بوجود انقسام كامل مواز للصفائح (شكل 19.2) ، ويمكن تمييز أكثر من اثني عشر نوعا من معادن الطين على أساس البنية البلورية والاختلاف في التركيب الكيميائي . ويمثل معدن الكاولينيت

معدن شائع في الصخور القارية مثل صخر الجرانيت الناري وصخر الشست المتحول .
وتتميز المعادن الطينية بتركيبها الصفائحي ، وتكون أكثر انتشارا في حياتنا اليومية من بقية المعادن ، حيث تكون جزءاً رئيسياً من تركيب التربة. وتتكون المعادن الطينية عند سطح الأرض عندما يتفاعل الهواء والماء مع المعادن السيليكاتية المختلفة ، فتتسكك لتكوّن معادن



شكل (19.2): البنية الصفائحية للميكا

- (أ) صفائح من الميكا تنفصل على امتداد أسطح الانقسام . من منطقة روض البرام ، الصحراء الشرقية - مصر (مجموعة أ.د. محمود فوزى الرمل ، متحف قسم الجيولوجيا ، جامعة الأزهر) .
(ب) علاقة التركيب البنائي للميكا بالانقسام cleavage ، حيث توجد الكاتيونات كطبقة فاصلة بين الصفائح المتراصة .



شكل (19.2): صورة باستخدام الميكروسكوب الإلكتروني للماسح معدن الصلصال الذئقية (كاولينيت kaolinite)، حيث يبدو الانقسام الكامل مواز للصفائح للمكونة من السيليكات. الواحات الخارجة - الصحراء الغربية - مصر.

(After Abu-Zeid, M.M., 1982: Authigenic clay minerals in the Nubia Sandstone of Kharga Oasis (Western Desert, Egypt) as revealed by Scanning Electron Microscopy, Jb. Miner. Abh, 144, 2)

75٪ من حجم هذه القشرة. كما أن الفلسبار شائع أيضا في صخور قيعان المحيطات.

والفلسبار له التركيب الإطاري (الهيكل) نفسه للكوارتز، إلا أنه يختلف عنه في أن الكوارتز يتكون من الأكسجين والسيليكون فقط، بينما تحتوي ربايعات الأوجه السيليكاتية في الفلسبار على Al^{3+} ليحل محل Si^{4+} ، وتصبح الصيغة الكيميائية $(AlSi_3O_8)$. ويؤدي ذلك إلى وجود شحنة سالبة زائدة يتم معادلتها بإضافة أيون K^+ لتصبح الصيغة $KAlSi_3O_8$ ، وهو معدن الأرتوكليز أحد أهم معادن مجموعة الفلسبار. وفي معدن الألبيت $NaAlSi_3O_8$ ، وهو معدن مهم آخر، يعادل أيون الصوديوم الشحنة السالبة بدلا من أيون البوتاسيوم. أما المعدن المهم الثالث في تلك المجموعة فهو معدن الأنورثيت، الذي يحتوى على الكالسيوم بدلا من البوتاسيوم أو الصوديوم. ونظرا لوجود شحنتين موجبتين على أيون الكالسيوم Ca^{2+} ، فلا بد أن يحدث تعديل، حيث يتم إدخال أيون ألومينوم ثنائي Al^{3+} بدلا من أيون سيليكون آخر Si^{4+} لتصبح الصيغة الكيميائية $CaAl_2Si_2O_8$ (معدن الأنورثيت).

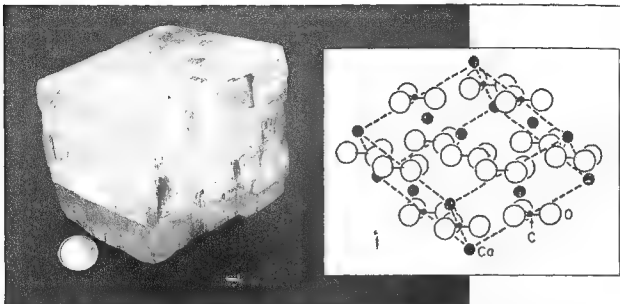
وحيث إن ذرتي الصوديوم والكالسيوم متقاربتان في نصف القطر، فإن أيون الكالسيوم Ca^{2+} يحل محل أيون الصوديوم Na^+ لإحلالا كاملا في البنية البلورية ليعطى عددا من المعادن ذات التركيب المتوسط بين

$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$ أحد معادن الطين الشائعة في الرواسب، وهو مادة خام رئيسية في صناعة الفخار والخزف والصيني.

وتتكون معادن مجموعة السربنتين serpentine group من مادة ثلاثية الشكل trimorphous، لها تركيب كيميائي واحد $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$ ، ولكنها تتكون ثلاثة معادن تختلف في بنائها البلوري وشكلها البلوري، وهي معادن الكريزوتيل والأنتيجوريت والليزارديت، والتي توجد مع بعضها البعض ككتل خضراء دقيقة الحبيبات، وهي تتكون نتيجة تغير معادن الأوليفين أو أي معادن سيليكاتية أخرى. ويطلق على معدن الكريزوتيل، المكون من ألياف بيضاء، والاسم التجارى الأمبستوس.

الترايط أو التشابك الإطاري (الهيكل)

يحدث الترايط أو التشابك الإطاري (الهيكل) framework عندما تشارك جميع أيونات الأكسجين في كل ربايعات الأوجه مع ربايعات أوجه أخرى لتكون بناءً هيكليا يمتد في الأبعاد الثلاثة. ومن معادن السيليكات ذات البنية الإطارية (الهيكلية) مجموعة معادن الفلسبار والسيليكات feldspar and silica groups، والتي تمثل أكثر المعادن شيوعا في القشرة الأرضية، حيث يكون الفلسبار نحو 60٪ من كل معادن القشرة القارية، وهو يكون مع الكوارتز نحو



شكل (20.2): معدن الكالسيت

(أ) التركيب الذري للكالسيت

(ب) المجاهات الانقسام الثلاثة المميزة للكالسيت ، وادي أم بترور ، غرب جبل موليحة - الصحراء الشرقية - مصر . (مجموعة أ.د. محمود فوزي الرمل ، متحف قسم الجيولوجيا ، جامعة الأزهر) .

تبدو عديمة التبلور ، ولا يمكن التعرف البنية البلورية الداخلية التي تميز المعادن إلا باستخدام ميكروسكوبات ذات قوة تكبير عالية أو باستخدام الأشعة السينية أو وسائل بحث أخرى . وتعرف أشكال الكوارتز دقيقة الحبيبات بالكالسيدوني chalcidony . وتشمل أنواع الكالسيدوني نوعيات ملونة يستعمل بعضها كأحجار شبه كريمة مثل الأجيث ، وهو يتميز بوجود راقات ملونة ، والفلنت وهو نوع صلد وكثلي ، والجاسبر وهو ذو لون أحر متجانس .

ب- الكربونات

يعتبر معدن الكالسيت (كربونات الكالسيوم $CaCO_3$) من أكثر المعادن غير السيليكاية شيوعا في القشرة الأرضية (شكل 20.2 أ) ، كما يعتبر المكون الرئيسي في مجموعة من الصخور يطلق عليها الصخور

معديني الألييت والأونثريت . وتعرف هذه السلسلة من المعادن بالبالاجيوكليس .

وتشمل مجموعة معادن السيليكا معدن الكوارتز SiO_2 ، وهو المعدن الشائع الوحيد المكون من الأكسجين والسيليكون فقط . ويعتبر ثاني أكسيد السيليكون أبسط السيليكات من الوجهة الكيميائية ، ويسمى أيضا سيليكاً . ويكون معدن الكوارتز بلورات سداسية الجوانب لها ألوان جميلة ، وتنشأ الألوان من وجود كميات ضئيلة من الحديد أو الألومنيوم أو التيتانيوم أو أى عناصر أخرى تتواجد نتيجة الإحلال الأيوني . ويوجد الكوارتز في الصخور النارية والمتحولة والرسوبية . والكوارتز أحد أكثر المعادن انتشارا كحجر كريم ومعدن زينة . كما توجد أنواع معينة من الكوارتز التي تتكون نتيجة الترسيب من محاليل ماء بارد وتكون دقيقة الحبيبات جدا للدرجة أنها

بوجود بنية محكمة التعبئة في صورة المكعب ، وله كثافة عالية تصل إلى 3.6 جم/سم³ ، مما يعكس ظروف تكوينه تحت ضغط مرتفع وحرارة عالية. والسينيل الشفاف من المعادن الكريمة التي تشبه الباقوت والسافير ، ويوجد ضمن مجوهرات التاج الإنجليزي والروسي .

د - الكبريتيدات

تضم مجموعة الكبريتيدات الخامات الرئيسية لمعظم المعادن ذات القيمة الاقتصادية مثل النحاس، والزنك والشكل . وتشمل هذه المجموعة مركبات لأيون الكبريتيد S^{2-} مع كاتيونات فلزية حيث تكتسب ذرة الكبريت في أيون الكبريتيد إلكترونان من غلافها الخارجي. وتبدو معظم معادن الكبريتيدات مثل الفلزات، كما أن كلها تقريبا معتمة. وتختلف بنيت هذه المعادن نتيجة الطريقة التي تتحد بها أيونات الكبريتيد مع الكاتيونات الفلزية، ومعادن البيريت FeS_2 من أكثر معادن الكبريتيدات انتشارا ، والذي يطلق عليه كثيرا " ذهب المغفلين " بسبب بريقه الفلزي الأصفر.

هـ الكبريتات

يتواجد الكبريت في الكبريتات على هيئة أيون الكبريتات، وهو عبارة عن شكل رباعي الأوجه مكون من ذرة كبريت واحدة فقدت 6 إلكترونات من مدارها الخارجي ومتحدة مع 4 أيونات أكسجين (O^{2-}) لتعطى الصيغة SO_4^{2-} . وأيون الكبريتات هو القاعدة لبنيات عديدة. ومعادن الجبس هو أكثر معادن هذه المجموعة شيوعا ، وهو المكون الأولي للجبص. ويتكون

الجيرية. والوحدة البنائية الأساسية في هذا المعدن هي أيون الكربونات $(CO_3)^{2-}$ المكون من ذرة كربون محاطة بثلاث ذرات أكسجين في شكل مثلث. حيث يتشارك أيون الكربون مع أيونات الأكسجين في الإلكترونات. وتترتب مجموعات أيونات الكربونات في صفائح مائلة إلى حد ما للسيليكات الصفائحية . حيث ترتبط الصفائح مع بعضها البعض بطبقات من الكاتيونات (شكل 20.2 ب). ففي معدن الكالسيت تفصل طبقات من أيونات الكالسيوم صفائح أيونات الكربونات. كما أن معدن الدولوميت وهو معدن شائع أيضا في القشرة الأرضية ، تركيبه $CaMg (CO_3)_2$ ويتكون أيضا من نفس صفائح الكربونات المنفصلة عن بعضها بعضا بطبقات متبادلة من أيونات الكالسيوم وأيونات الماغنسيوم .

ج - الأكاسيد

تتكون معادن الأكاسيد من مركبات كيميائية يرتبط فيها الأكسجين مع ذرات أو كاتيونات لعناصر أخرى، تكون عادة فلزية مثل الحديد (Fe^{2+} أو Fe^{3+}). وترتبط معظم معادن الأكاسيد أيونيا، حيث تتغير البنيتات تبعا لحجم الكاتيونات الفلزية. وهذه المجموعة لها أهمية اقتصادية كبيرة ، حيث إنها تضم خامات معظم الفلزات، مثل الكروم والتيتانيوم ، المستخدمة في صناعة المواد الفلزية، كما أن الهيماتيت Fe_2O_3 هو أحد خامات الحديد الأساسية .

ومن المعادن الشائعة الأخرى في هذه المجموعة معدن السينيل ، وهو أكسيد يتكون من فلزي الماغنسيوم والألومنيوم $MgAl_2O_4$. ويتميز هذا المعدن

حد ما . وقد اعتاد الجيولوجيون منذ القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين حمل أدوات للتحليل الكيميائي الأولى للمعادن في الحقل للمساعدة في التعرف عليها. وأحد هذه الاختبارات استخدام حمض الهيدروكلوريك المخفف (HCl) على المعدن لرؤية فورانه من عدمه. وبدل الفوران على هروب ثاني أكسيد الكربون (CO₂) مما يعنى احتلال أن يكون المعدن كربوناتي التركيب . ومنستعرض بقية هذا الفصل الخواص الطبيعية للمعادن التي يدل الكثير منها على قيمتها العملية التطبيقية أو استخدامها كأحجار كريمة.

أ- الصلادة

الصلادة **hardness** إحدى الصفات المهمة

للمعادن ، وهى صفة تعبر عن مقاومة المعدن للخدش. فكما أن الماس هو أعلى المعادن المعروفة صلادة يخدش الزجاج ، فالكوارتز يخدش الفلسبار لأنه أكثر صلادة منه . ولا يتطلب قياس الصلادة وسائل خاصة ، حيث ابتكر فريدريك موهز Friedrich Mohs عام 1882م مقياسا للصلادة يعرف بمقياس موهز للصلادة **Mohs scale of hardness** ، ويتكون من عشرة معادن ذات صلادات متدرجة . وقد أعطى كلا منها رقما يبدأ من أقلها صلادة وهو التلك الذي يحمل رقم (1) إلى أكثرها صلادة وهو الماس ويعمل رقم (10) . ويستطيع المعدن الأعلى في الترتيب أن يخدش المعدن الأدنى في الترتيب . وبالتالي فإن الماس يستطيع أن

معدن الجبس نتيجة بخر ماء البحر، حيث يتحد أيونا الكالسيوم Ca^{2+} والكبريتات SO_4^{2-} وهما أيونان شائعان في ماء البحر، ويترسب الجبس كطبقات في الرواسب، مكونا كبريتات الكالسيوم $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ، (النقطة في هذه الصيغة تعنى أن جزئى الماء مرتبطان مع أيونات الكالسيوم والكبريتات) . أما معدن الأنهدريت $CaSO_4$ والذي يختلف عن معدن الجبس في عدم احتوائه على الماء . وقد اشتق اسم معدن الأنهدريت من كلمة **anhydrous** والتي تعنى "دون ماء" . ومعدن الجبس يكون مستقرا تحت درجات الحرارة والضغط المنخفضة السائدة عند سطح الأرض ، بينما يكون معدن الأنهدريت مستقرا عند درجات الحرارة الأعلى ، وضغوط الصخور الرسوبية المدفونة .

ولا ترجع أهمية البنية البلورية والتركيب الكيميائي للمعادن إلى الحاجة إليها في ترتيب معلوماتنا عن المعادن فقط ، ولكن للحاجة إليها أيضا في تعرف الخواص الفيزيائية للمعادن وهو ما سنناقشه فيما يلى :

VII الخواص الفيزيائية للمعادن

يستخدم الجيولوجيون التركيبات الكيائية وبنيات المعادن لفهم أصل الصخور التي تكوّن بها هذه المعادن ، وبالتالي يمكن فهم طبيعة العمليات الجيولوجية التي تعمل داخل وفوق سطح الأرض. ويبدأ هذا الفهم غالبا في الحقل بمحاولات التعرف وتصنيف المعادن غير المعروفة حيث يعتمد الجيولوجيون على الخواص الكيميائية والفيزيائية التي يمكن ملاحظتها بسهولة إلى

جدول (3.2) - مقياس موهز للصلادة

الرقم النسبي في المقياس	المعدن	صلادة المواد الشائعة
10	الماس	
9	الكورندم	
8	التوباز	
7	الكوارتز	
6	الفلسبار البوتاس	
		نصل سكين ، زجاج نافذة
5	الأباتيت	
4	الفلوريت	
		عملة نحاسية
3	الكالسيت	
		ظفر الإنسان
2	الجبس	
1	التلك	

يُخدش الكوارتز (7) ، بينما يستطيع الكوارتز أن يُخدش كل المعادن التي تليه على المقياس مثل الكالسيت (3) (جدول 3.2).

وما يزال مقياس موهز أحد أفضل الوسائل العلمية لتعريف معدن غير معروف. فيستطيع جيولوجي الحقل عن طريق استخدام نصل سكين ، وبعض المعادن المعروفة على مقياس الصلادة ، تحديد موقع معدن غير معروف على مقياس موهز للصلادة. فإذا كان المعدن غير المعروف يمكن أن يُخدش بقطعة من الكوارتز، ولكن لا يُخدش نصل السكين، فالمعدن يقع بين 7 و5 على المقياس.

ونظرا لأن الروابط التساهمية تكون عموما أقوى

ب- الانقسام

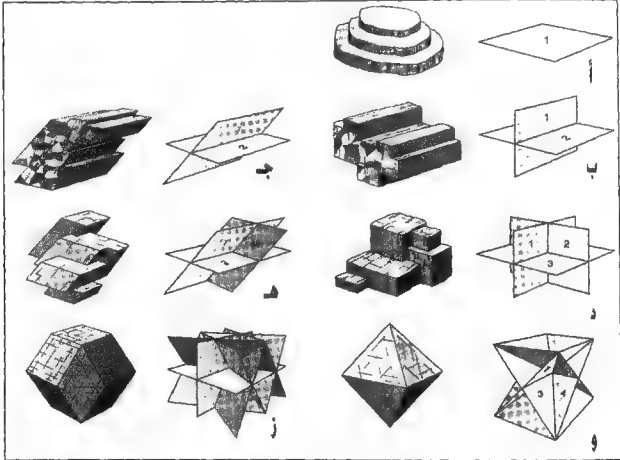
الانقسام cleavage هو قابلية بلورة معدن ما للتكسر على امتداد أسطح مستوية معينة، وينتج عنها أسطح جديدة تعرف بمستويات الانقسام. كما يستخدم المصطلح أيضا لوصف نمط الأشكال الهندسية الناتجة عن هذا التكسر. ويتناسب الانقسام عكسيا مع قوة الرابطة الكيميائية - فكلما كانت الرابطة أكثر قوة كان الانقسام أكثر ضعفا والعكس بالعكس. ولذلك تتميز المعادن ذات الرابطة التساهمية القوية عموما بانقسام ضعيف أو عدم وجود انقسام على الإطلاق. أما المعادن ذات الرابطة الأيونية الضعيفة نسبيا فإنها تتميز بانقسام كامل. فمعدن المسكوفيت وهو أحد معادن مجموعة الميكا السيليكاتية له بنية

من الروابط الأيونية ، وحيث إن صلادة أي معدن تعتمد على قوة رابطة الكيميائية ، فكلما كانت الرابطة قوية كان المعدن أكثر صلادة. ونظرا لعدم ثبات البنية البلورية في معادن مجموعة السيليكات ، فإن صلابتها تتغير أيضا. فصلادة معادن السيليكات تتفاوت من 1 في التلك (سيليكات صفائحية) إلى 8 في التوباز (معدن سيليكات مكون من رباعيات الأوجه المفردة). وتقع معظم السيليكات في المدى بين 5-7 على مقياس موهز للصلادة، باستثناء السيليكات الصفائحية التي تكون درجة صلابتها منخفضة، وتتراوح بين (1) و (3) .

وكذلك نوعية الأسطح الفاصلة ومدى سهولة عملية الانقسام.

عدد مستويات الانقسام ونمطه أحد السمات المميزة للعديد من المعادن المكونة للصخور (شكل 21.2). فمعادن المسكوفيت له مستوى انقسام واحد ، بينما يتميز الكالسيت والدولوميت بوجود ثلاثة مستويات انقسام ، مما يؤدي إلى تكوين شكل معين الأوجه.

صفائح على امتداد أسطح ناعمة مستوية ومتوازية ، وذات بريق ، مما يؤدي إلى تكون صفائح رقيقة شفافة سمكها أقل من مليمتر واحد . ويرجع وجود الانقسام التام في معادن الميكا إلى ضعف الروابط التي تفصل بين الطبقات المكونة من صفائح الميكا ، والتي تتكون من رباعيات الأوجه السيليكاتية (شكل 18.2) ، وتشبه طبقة الزيت الموضوعة بين شطرتي الخبز. ويصنف الانقسام طبقاً لعدد مستويات الانقسام ونمطه ،

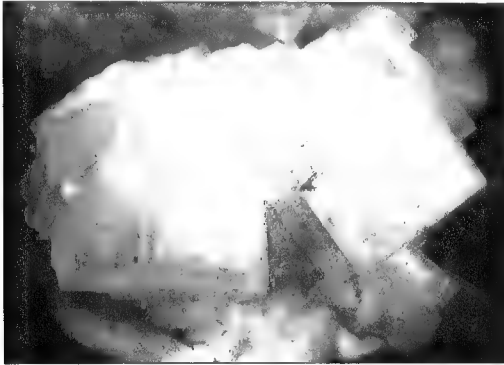


شكل (21.2): مستويات الانقسام وأنماطها

- (أ) اتجاه واحد للانقسام (مثل الميكا) .
 (ب) مستويان للانقسام يتقاطعان عند 90° (مثل الفلسبار) .
 (ج) مستويان للانقسام يتقاطعان عند زوايا مختلفة عن 90° (مثل الأمفيبول) . (د) ثلاثة مستويات انقسام تتقاطع عند 90° (مثل الهاليت) .
 (هـ) ثلاثة مستويات انقسام تتقاطع عند زوايا تختلف عن 90° (مثل الكالسيت) . (و) أربعة مستويات انقسام (مثل الماس) .
 (ز) ستة مستويات انقسام (مثل السفاليريت) .

قيمة الزاوية المحصورة بين مستويات الانقسام التعرف على مجموعتين مهمتين من السيليكات هما معادن البيروكسين والأمفيبول . أما معادن البيروكسين فتكون مستويات الانقسام متعامدة تقريبا على بعضها البعض (93°). ويبدو الانقسام في القطاع المستعرض لها على هيئة مربع تقريبا. أما معادن الأمفيبول فتتقاطع مستويات الانقسام مع بعضها البعض بزوايا 56° و124°. ويبدو الانقسام في القطاع المستعرض لمعادن الأمفيبول على هيئة شكل معيني.

وتحدد البنية البلورية للمعدن مستويات الانقسام وعدد أوجه البلورة. وتتميز البلورات عموما بوجود عدد من مستويات الانقسام أقل من عدد أوجهها البلورية . حيث تتكون الأوجه البلورية على امتداد العديد من المستويات التي تحدها صفوف من الذرات أو الأيونات ، بينما تتكون مستويات الانقسام على امتداد بعض هذه المستويات فقط ، عندما تكون الرابطة الكيميائية ضعيفة.



شكل (22.2): بلورات معدن هاليت ذات انقسام مكبي (ثلاثة مستويات انقسام كاملة تتقاطع عند زاوية قدرها 90°) . (مجموعة أ.د. سليمان محمود سليمان . قسم الجيولوجيا - جامعة عين شمس) .

نوعية سطح الانقسام وسهولته: يعتمد وصف انقسام المعدن على نوع الأسطح الناتجة عن الانقسام وسهولته . فقد يوصف الانقسام بأنه تام perfect إذا كان ينقسم بسهولة مكونا أسطح ناعمة ومستوية تماما، كما في معدن المسكوفيت . وقد يوصف الانقسام بأنه

وقد تتميز كل بلورات المعدن بوجود الانقسام المميز ، إلا أن بعض البلورات قد تظهر بعض الأوجه الخاصة . فبلورات معدن الجالينا PbS والهاليت NaCl (شكل 22.2) ، تنفصل على امتداد ثلاثة مستويات مكونة مكعبات كاملة . ويمكن اعتيادا على

ج- المكسر

يعرف المكسر fracture بأنه قابلية بلورة معدن ما لأن تتكسر تكسرا غير منتظم ، وغير مواز لأسطح الانقسام أو الأوجه البلورية. وتكسر كل المعادن إما عبر مستويات الانقسام وإما في أى اتجاه آخر، مثل الكوارتز الذى يتميز بغياب الانقسام . والمكسر يكون شائعا في المعادن ذات التراكيب المعقدة ، حيث لا توجد اتجاهات لروابط شديدة الضعف . ويرتبط المكسر بطريقة توزيع قوى الروابط التى تمر عبر أوجه البلورة. حيث يؤدي كسر هذه الروابط إلى مكسر غير منتظم. ويوصف المكسر بأنه محارى conchoidal عندما يكون سطح المكسر ناعما ومنحنيا ويشبه السطح المكسور لقطعة سميكة من الزجاج أو الشكل الداخلى لصدقة المحار، ومن أمثلة ذلك مكسر الكوارتز والجارنت. أما سطح المكسر الذى يشبه قطعة الخشب المشقوقة ، فيوصف بأنه ليفى fibrous (شكل 23.2) أو شطوى splintery . ويعتمد شكل ومظهر مكسر

جيد good إذا كانت أسطح الانقسام ليست بنفس درجة النعومة التى نراها في معادن الميكا . وقد يوصف الانقسام بأنه واضح (مقبول) fair إذا كان المعدن يتكسر بسهولة نسبية عبر مستويات غير مستويات الانقسام ، مثل معدن البيرل .

وعلى الجانب الآخر ، فإنه يوجد عديد من المعادن التى تتميز برابطة كيميائية قوية ، وبالتالي لا يوجد بها أى نوع من أنواع الانقسام. فمعدن الكوارتز (سيليكات ذات ترابط هيكلي) وهو أحد أكثر المعادن شيوعاً في القشرة الأرضية ، يتميز ببنية ذات ترابط قوى في كل الاتجاهات ، لدرجة أنه يتكسر فقط على أسطح غير مستوية. أما معدن الجارنت (سيليكات رباعية الأوجه مفردة) فتكون الرابطة الكيميائية فيه قوية في كل الاتجاهات ، وبالتالي لا يوجد به أى سطح انقسام. وبصفة عامة ، فإن السيليكات ذات الترابط الهيكلي ، وأيضا السيليكات رباعية الأوجه المفردة لا يوجد بها أى نوع من الانقسام .



شكل (23.2): إيسينوس يوضح المكسر الليفى fibrous fracture لمعدن الإيسينوس ، من منجم حفافيت - الصحراء الشرقية - مصر . (مجموعة أ.د. محمود فوزى الرملى ، متحف قسم الجيولوجيا ، جامعة الأزهر).

المعادن على البنية الخاصة لهذه المعادن وتركيبها الكيميائي .

د- البريق

يعرف البريق **luster** بأنه مظهر المعدن عند انعكاس الضوء على سطحه ، وتستخدم المصطلحات الواردة في جدول (4.2) في وصف بريق المعادن . ويعتمد بريق المعادن على البنية البلورية لها وما تحويه من ذرات ، وأيضا على نوع الرابطة الكيميائية بين ذراتها ، والتي تؤثر على مرور الضوء خلال المعدن أو انعكاسه على سطحه . فتميل البلورات ذات الرابطة الأيونية لأن تكون ذات بريق زجاجي **glassy** أو **vitreous** ، بينما يكون بريق المعادن ذات الرابطة التساهمية أكثر تنوعا ، فيكون لبعضها بريق ماسي مثل بريق الماس **adamantine luster** ، بينما تبدو الفلزات النقية بريقا فلزيا **metallic luster** مثل الذهب وكذلك الكبريتيدات مثل الجالينا **PbS** . أما البريق اللؤلؤي **pearly luster** فينتج من انعكاسات عديدة للضوء من مستويات تحت أسطح المعادن شبه الشفافة ، مثل السطح الداخلي لأصداف المحارات المتكوّنة من معدن الأراجونيت . وعلى الرغم من أن نوعية البريق هي صفة مهمة للتعرف على المعادن في الحقل ، إلا أنها تعتمد بدرجة كبيرة على الإحساس بالضوء المنعكس . وكذلك فلا بد من الخبرة في التعرف على نوعية البريق أثناء مسك المعدن باليد . وتجدر الملاحظة أن المعادن التي ليس لها بريق يقال إن لها بريقا منطفئا .

جدول (4-2) المصطلحات المستخدمة في وصف بريق المعدن

فلزي Metallic	انعكاسات قوية من أسطح المعادن الممتعة (مثل الذهب والجالينا)
زجاجي Vitreous	لامع كما في الزجاج (مثل معدن الكوارتز والكالسيت)
صمغي Resinous	يُميز للمواد الصمغية (كما في مادة العنبر)
شحمي (معنى) Greasy	يبدو المظهر كما لو أن السطح مغشى بزيادة زيتية (مثل معدن الكبريت)
لؤلؤي Pearly	بريق أبيض مثل بريق حبات اللؤلؤ (مثل معدن المسكوفيت)
حريرى Silky	بريق المواد الليقية مثل الحرير (مثل بعض أنواع معدن الجبس)
ماسي Adamantine	البريق اللامع للماس والمواد الشبيهة

هـ- اللون والمخدش

يظهر الضوء لون المعدن **color** سواء كان منعكسا أو نافذا خلال بلورات المعدن في الكتل غير المنتظمة منه . أما المخدش **streak** فهو مصطلح يطلق على لون مسحوق المعدن الناتج عن حك المعدن على سطح خشن صلب مثل قطعة من الخنزف غير المصقول يطلق عليه لوح المخدش **streak plate** . ويعتبر لوح المخدش وسيلة مهمة لفحص لون المعدن ، لأن الحبيبات الدقيقة المتساوية الحجم في مسحوق المعدن تسمح بفحص لون المعدن بطريقة أفضل من فحصه كتكتلة كاملة من المعدن . فعلى سبيل المثال ، فإن معدن الهيماتيت Fe_2O_3 قد يكون لونه أسود أو أحمر أو بنيًا ، بينما يكون لون مخدشه بنيًا مائلاً إلى الحمرة دائما .

والملاكييت الأخضر الزاهي ، بينما يتغير لون بعضها مثل الكوارتز الذى يتغير لونه بدرجة كبيرة ، من عديم اللون إلى أبيض أو بنفسجى أو مدخن . كما أن عديدًا من المعادن تبدى اللون المميز على السطح المكسور حديثًا فقط ، بينما يظهر البعض الآخر اللون المميز على السطح المتغير نتيجة التجوية .

و- الكثافة والكثافة النوعية

تعرف الكثافة **density** بأنها كتله وحدة الحجم للمادة (يعبر عنها دائمًا بالجرام لكل سنتيمتر مكعب ، g/cm^3) . وقد حاول العلماء الوصول إلى طريقة سهلة لقياس هذه الخاصية ، حيث استخدمت الكثافة النوعية **specific gravity** كقياس موحد للكثافة . وتعرف الكثافة النوعية أنها عبارة عن النسبة بين وزن المعدن في أهواء إلى وزن حجم مساو له من الماء النقى عند $4^{\circ}C$. فمثلاً ، إذا كان وزن أى معدن يساوى أربعة أضعاف وزن حجم مساو له من الماء فإن الكثافة النوعية للمعدن تساوى 4.

وتعتمد الكثافة على الوزن الذرى لأيونات المعدن، ودرجة إحكام البنية البلورية للمعدن . فمعدن الماغنيتيت Fe_3O_4 كثافته 5.2 جم/سم³ . وترجع هذه الكثافة العالية إلى الوزن الذرى العالى للحديد، كما ترجع أيضاً إلى البنية البلورية المحكمة لهذا المعدن . ويشبه معدن الماغنيتيت في كثافته العالية باقى معادن مجموعة السبينيل كما أسلفنا سابقاً . أما كثافة معدن الأوليفين والمحتوى على عنصر الحديد فتكون 4.4 جم/سم³ ، وهى أقل من معدن الماغنيتيت ، وذلك

وينشأ اللون في المعادن النقية من وجود أيونات معينة مثل الحديد أو الكروم ، والتي تمتص أجزاء من طيف الضوء . فالأوليفين المحتوى على عنصر الحديد مثلاً ، يمتص كل الألوان ماعدا اللون الأخضر الذى ينعكس فنراه أخضر اللون . أما الأوليفين النقى المحتوى على عنصر الماغنسيوم فيكون شفافاً عديم اللون . وعموماً ، فإن معظم المعادن النقية ، ذات الروابط الأيونية ، والتي تكون مدارات أيوناتها الخارجية مشبعة ومستقرة ، مثل معدن الهاليت ، تكون عديمة اللون **colorless** . وعلى الجانب الآخر ، فإن كل المعادن الطبيعية تحتوي على شوائب من العناصر التي أمكن حديثاً قياسها ، والتي تعرف بالعناصر الشحيحة **trace elements** (تركيزها أقل من 0.1% من العناصر المكونة للمعدن) . فوجود العناصر الشحيحة في المعادن المعروفة بأنها عديمة اللون يكسبها لونا ، حيث يؤدي وجود القليل من أكسيد الحديد في بلورة معدن الفلسبار أن يكون لونها بنياً أو ذا حمرة واضحة . كما أن هناك عديدًا من المعادن الكريمة مثل الزمرد **emerald** (البريل الأخضر) والسافير (الكوراندوم الأزرق) تكتسب ألوانها من شوائب العناصر الشحيحة التي توجد بها . فالزمرد يكتسب لونه الأخضر من الكروم، بينما يكتسب السافير لونه الأزرق من الحديد والتيتانيوم .

وعلى الرغم من أن لون المعدن هو أكثر الصفات وضوحاً في المعدن ، إلا أنه يعتبر أقل الصفات أهمية من حيث الاعتماد عليه في تمييز المعدن . فبعض المعادن تبدى دائماً نفس اللون ، مثل الكبريت أصفر اللون

كانت البنية البلورية أقل إحكاما وأكثر تباعدا، وبالتالي قلت الكثافة.

ز- هيئة البلورة

إن هيئة البلورة **crystal habit** لمعدن ما، هي الشكل أو الهيئة التي تبدو عليها البلورة أو التجمع البلوري. وتوصف غالبا هيئة البلورة طبقا للشكل الهندسي العام لها، فنقول إن البلورة نصليّة blades أى تشبه نصل النبات أو لوحية plates أى تشبه اللوح أو إبرية needles وهكذا. كما أن بعض المعادن التي لها هيئات مميزة تجعل من السهل التعرف على هذه المعادن. فمثلا بلورة معدن الكوارتز تكون على هيئة عمود سداسي يعلوه مجموعة من الأوجه الهرمية الشكل. ولا تعكس هذه الأشكال مستويات الذرات أو الأيونات في البنية البلورية للمعدن فقط، ولكنها تعكس أيضا سرعة واتجاه نمو البلورات. فالشكل الإبري لبلورة ما، يعنى النمو السريع في أحد الاتجاهات والبطء الشديد في باقى الاتجاهات. أما البلورة التي تشبه اللوح، فإنها تنمو بسرعة في كل الاتجاهات العمودية على اتجاه واحد للنمو البطيء للبلورة. أما البلورات الليفية فإنها تأخذ شكل ألياف عديدة طويلة ورفيعة على هيئة تجمع من الإبر الطويلة.

والخلاصة، فإن المعادن تتميز بعدديد من الخواص الفيزيائية والكيميائية، والتي تنتج عن التركيب الكيميائي والبنية البلورية الداخلية. ويكون عديد من هذه الخواص مفيدا للعاملين في علم المعادن خصوصا والجيولوجيا عموما من أجل تعريف وتصنيف المعادن.

لسببين هما الوزن الذرى للسيليكون (وهو أحد العناصر المكوّنة لمعدن الأوليفين) الذى يكون أقل من الوزن الذرى للحديد، والبنية البلورية الأكثر إحكاما في معدن الماغنيتيت (مجموعة السبيل) عنها في معدن الأوليفين، أما كثافة الأوليفين المحتوى على عنصر الماغنسيوم فتكون أقل من تلك التى تميز الأوليفين المحتوى على الحديد وتصل إلى 3.3 جم/سم³، حيث أن الوزن الذرى للماغنسيوم أقل بكثير من الوزن الذرى للحديد.

وتؤثر الزيادة في الكثافة، الناشئة عن الزيادة في الضغط، على درجة نفاذية الضوء وانتقال الحرارة والموجات الزلزالية في المعادن. ولقد أظهرت التجارب أن بنية معدن الأوليفين تتحول إلى بنية أكثر إحكاما، ومماثلة لمجموعة السبيل عند الضغوط العالية جدا، والتي تتوافر عند عمق نحو 400 كم. أما عند الأعماق الأكبر من ذلك، والتي تصل إلى 670 كم، حيث تتحول مواد الوشاح إلى معادن سيليكات ذات بنية بلورية أكثر إحكاما من البنيات السابقة فيتكون معدن بيروفسكيت (CaTiO_3 pervoskite). ولضخامة حجم الوشاح السفلى، فإن السيليكات التى لها بنية معدن البيروفسكيت ربما تكون أكثر المعادن شيوعا في الأرض كلها. ولقد ساعد علماء المعادن في تصنيع بعض معادن البيروفسكيت لتصبح أشباه موصلات عند درجات الحرارة العالية والتي توصل الكهرباء بدون أية مقاومة، وهى من أشباه الموصلات ذات القيمة التجارية العالية. ومن ناحية أخرى، فإن الحرارة تؤثر أيضا على الكثافة، فكلما ارتفعت درجة الحرارة

عملية التجوية . ويمكن بذلك استنتاج المناخات التى كانت تسود الكرة الأرضية فى الماضى من أنواع المعادن المحفوظة فى الصخور الرسوبية . كما يمكن أيضا تحديد التركيب الكيميائى لماء البحر فى الأزمنة الماضية من المعادن التى تكونت أثناء تبخر ماء البحر وترسيب الأملاح.

الملخص

1- المعدن ، هو الوحدة البنائية للصخور ، وهو كل مادة صلبة غير عضوية موجودة فى الطبيعة ، لها بنية بلورية مميزة ، وتركيب كيميائى ثابت أو متغير فى مدى محدود .

2- يتكون المعدن من ذرات ، وهى أصغر وحدات المادة التى تدخل فى التفاعلات الكيميائية . وتتكون الذرة من نواة مكونة من بروتونات ونيوترونات ، تحيط بها مدارات تدور فيها الإلكترونات . والعدد الذرى للعنصر يساوى عدد البروتونات الموجودة فى نواته أو عدد الإلكترونات التى تدور حول النواة ، بينما يساوى الوزن الذرى له مجموع كتل البروتونات والنيوترونات الموجودة فى نواته .

3- تتفاعل المواد الكيميائية مع بعضها إما باكتساب الإلكترونات وإما فقدها لتتحول إلى أيونات ، وإما بالمشاركة فى الإلكترونات لتكوين مركبات كيميائية جديدة ، حيث يتم الارتباط بروابط أيونية فى الأولى أو تساهمية فى الثانية ، فى محاولة للوصول إلى حالة استقرار أغلفة الإلكترونات .

ويقوم الجيولوجيون بدراسة التركيب الكيميائى والبنية البلورية الداخلية للمعادن فى محاولة لفهم أصل الصخور التى تتكون منها المعادن ، وبالتالي طبيعة العمليات الجيولوجية داخل الأرض وفوق سطحها.

VIII. المعادن كأدلة على بيئات التكوين

لا تستخدم المعادن فقط كأحجار للزينة أو كمصادر لمواد ذات قيمة اقتصادية ، وإنما تستخدم أيضا كأدلة على الظروف الفيزيائية والكيميائية التى تكونت تحتها تلك المعادن ، وبالتالي الصخور التى تحتوى تلك المعادن ، والتى تتواجد فى مناطق لا يمكن مشاهدتها أو قياس العوامل المؤثرة فيها مباشرة.

وقد حدث تقدم هائل فى فهمنا لبيئات تكوين المعادن خلال دراسة المعادن فى المعمل ، حيث تمكن العلماء باستخدام تجارب مناسبة من تحديد درجات الحرارة والضغط العالية التى يتكون عندها الماس بديلا عن الجرافيت ، الذى يحتاج لدرجات حرارة وضغط أقل . فالماس والجرافيت هما معدنان ثنائيا الشكل ، أى أن كليهما يتكون من الكربون ، بينما يكون لهما بناءان بلوريان مختلفان . وحيث إنه من المعروف أن درجة الحرارة والضغط تزداد مع زيادة العمق فى القشرة الأرضية ، فإن الماس يتكون فى صخور الوشاح التى تتكون على عمق لا يقل عن 150 كم تحت سطح الأرض.

كما أن هناك مثالا آخر يرتبط بعملية التجوية ، حيث يتحكم المناخ الذى يتغير من بارد رطب إلى حار جاف فى توزيع المعادن فى الغلاف الصخري للأرض أثناء

- 4- عندما يتبلور معدن ما فإن الذرات أو الأيونات تتجمع بنسبة ثابتة لتتكون بنية بلورية ، هى عبارة عن صفوف هندسية فى الأبعاد الثلاثة يتكرر فيها الترتيب الأساسى فى كل الاتجاهات.
- 5- تتكون البنية البلورية لمعادن السيليكات ، والتي تعتبر أهم المعادن المكونة للقشرة الأرضية، من رباعيات الأوجه السيليكاتية والمرتبطة بطرق عديدة منها : رباعيات الأوجه المفردة مثل الأوليفين أو فى حلقات مثل الكورديريت أو فى سلاسل مفردة مثل البيروكسينات أو فى سلاسل مزدوجة مثل الأمفيبولات أو فى صفائح مثل الميكا أو فى ترابط هيكلى فى الأبعاد الثلاثة مثل الفلسبارات ومعادن السيليكات.
- 6- تتكون معادن الكربونات من أيون الكربونات الذى يرتبط بأيون الكالسيوم أو الماغنسيوم أو هما معا. أما معادن الأكاسيد فهى مركبات تتكون من الأكسجين والعناصر الفلزية . بينما تتكون البنية البلورية لمعادن الكبريتيدات والكبريتات من ذرات الكبريت المتحدة مع العناصر الفلزية.
- 7- تعكس الخواص الفيزيائية للمعادن التركيب الكيميائى والبنية البلورية للمعادن . وتشمل الخواص الفيزيائية للمعادن الصلادة وهى مقاومة المعدن للخدش ، والانقسام وهو قابلية المعدن للتكسر أو الانفصال على امتداد أسطح مستوية فى المعدن ، والمكسر هو الطريقة التى يتكسر بها المعدن على امتداد أسطح غير منتظمة فيه ، والبريق وهو مظهر المعدن عند انعكاس الضوء على سطحه ، واللون الذى يظهر عندما ينفذ الضوء خلاله أو يتعكس على سطح بلوراته أو على سطح كتلة غير منتظمة الشكل منه ، والمخدش وهو لون مسحوق ناعم من المعدن ، والكثافة أو كتلة وحدة الحجم ، والهيئة البلورية وهو الشكل أو الهيئة التى تبدو عليها البلورة أو التجمعات البلورية.
- 8- تستخدم المعادن كأدلة على الظروف الفيزيائية (درجات الحرارة والضغط) والكيميائية التى تكونت عندها المعادن ، بالإضافة إلى استخدامها كمصادر لمواد ذات قيمة اقتصادية وكأحجار للزينة.

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

<http://mineral.galleries.com/><http://webmineral.com/><http://www.rockhounds.com/rockshop/table.shtml><http://www.prenhall.com/tarbuck>

المصطلحات المهمة

amorphous materials	مواد غير متبلورة	ionic bond	رابطة أيونية
anion	أيون	ionic substitution	إحلال أيوني
atom	ذرة	isotope	نظير
atomic mass	الكتلة الذرية أو الوزن الذري	luster	بريق
atomic number	الرقم الذري	magma	صهارة
cation	كاتيون	major elements	عناصر رئيسية
chemical reaction	تفاعل كيميائي	mineral	معادن
cleavage	انقسام	mineral group	مجموعة معدنية
color	لون المعدن	mineralogy	علم المعادن
covalent bond	رابطة تساهمية	mineraloid	شبه معدن
crystal	بلورة	Mohs scale of hardness	مقياس موهز للصلادة
crystal habit	هيئة البلورة	neutron	نيوترون
crystal lattice	شبكة بلورية	nucleus (nuclei)	نواة (ج. نويات)
crystal structure	بنية بلورية	polymorph	متعدد الشكل
Crystalline material	مادة متبلورة	polymorphism	تعدد شكل
crystallization	تبلور	precipitate	ترسيب
density	كثافة	proton	بروتون
electron	إلكترون	shell	غلاف
electron sharing	مشاركة الإلكترون	specific gravity	كثافة نوعية
fracture	مكسر	streak	مخدش
hardness	صلادة	trace element	عنصر شحيح
ion	أيون		

الأسئلة

- 1 - عرّف المعدن.
- 2 - ما الفرق بين الذرة والأيون ؟ اذكر الوحدات التى تتكون منها الذرات.
- 3 - ارسم البناء الذرى لكلوريد الصوديوم.
- 4 - اذكر أنواع الروابط الكيميائية .
- 5 - ما المعدنان اللذان يمثلان التعدد الشكلى لعنصر الكربون ؟
- 6 - اذكر البنية الأساسية لمعادن السيليكات.
- 7 - كيف تميز بين البلورة والمادة المتبلورة ؟
- 8 - ما الخاصية المشتركة التى تميز المعادن الحديدومغنيسية ؟ اذكر أمثلة للمعادن الحديدومغنيسية .
- 9 - ما العاملان اللذان يؤثران على كثافة معادن الوشاح ؟
- 10 - هل توجد علاقة بين الانفصام الكامل والبنية البلورية فى الميكا ؟ لماذا لا يوجد انفصام فى معادن الكوارتز والأليفين ؟
- 11 - ما الفرق بين المعادن والصخور ؟
- 12 - ما الفرق بين السيليكون والسيليكات ؟
- 13 - ما العوامل التى تحكم إحلال عنصر محل آخر فى معدن ؟
- 14 - لماذا تختلف الخصائص الفيزيائية لكل من الجرافيت والماس بدرجة كبيرة ؟

الفصل

3

الصخور : سجل العمليات الجيولوجية

I. الصخور النارية :

أ. الصخور النارية المتداخلة

ب. الصخور النارية المتبقفة

ج. الصخور النارية الشائعة

II. الصخور الرسوبية :

أ. الرواسب الفتاتية

ب. الرواسب الكيمائية والكيميائية الحيوية

ج. التصخر : تحول الراسب إلى صخر صلب

د. الصخور الرسوبية الشائعة

III. الصخور المتحولة :

أ. التحول الإقليمي والتحول التماسي (الحرارى)

ب. الصخور المتحولة الشائعة

IV. تواجيدات الأنواع المختلفة للصخور :

V. دورة الصخور :

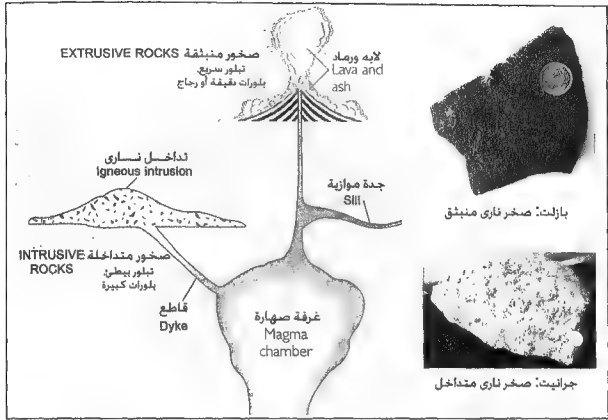
أ. دورة الصخور وتكتونية الألواح

يتكون الغلاف الصخري للأرض من ثلاثة أنواع من الصخور، هي الصخور النارية والرسوبية والمتحولة. ويُعرف الصخر بأنه كل مادة صلبة متماسكة غير حية تكونت طبيعياً من معدن واحد أو من خليط من عدة معادن، وتكون جزءاً من كوكب. وتتنوع الصخور في ألوانها وفي حجم البلورات أو الحبيبات المكونة لمعادنها، وأيضاً في أنواع المعادن التي تتكونها. ويحدد مظهر الصخور وصفاتها تركيبها المعدني ونسيجها. فالتركيب المعدني *mineralogical composition* أى نسب مكونات الصخر من المعادن تساعد في تحديد مظهر الصخر، بالإضافة لعدد من الصفات الأخرى. كما يساهم النسيج *texture* وهو ما يطلق على حجم وشكل وطريقة ترتيب بلورات وحبيبات المعدن المكونة للصخر، والطريقة التي تتواجد بها تلك المكونات مع بعضها البعض، في تحديد سمات وخصائص الصخر أيضاً. وتصنف عادة هذه البلورات أو الحبيبات، والتي لا يتجاوز قطرها عدة ميلليمترات قليلة في معظم الصخور إلى خشنة *coarse*، إذا كانت الحبيبات كبيرة لدرجة يمكن تمييزها بالعين المجردة، أو دقيقة *fine* إذا لم يكن من الممكن تمييزها بالعين المجردة. كما يمكن أن تختلف أيضاً بلورات أو حبيبات المعدن في الشكل أو الهيئة، حيث تكون إبرية الشكل *needle-shaped* أو

مسطحة *flat* أو لوحية *platy* أو منشورية *prismatic* أو صفائحية *tabular* أو متساوية الأبعاد *equant* أى لها نفس البعد في كل الاتجاهات مثل الكرة أو المكعب. وتؤدي هذه الاختلافات في التركيب المعدني والنسيج إلى عديد من الملامح والمظاهر الكبيرة التي تميز بين الأنواع المختلفة للصخور. كما تساهم أيضاً في تحديد الأصل الجيولوجي للصخور، أى تحديد مكان وطريقة تكوينها. وتمثل الصخور النارية 95% من حجم الصخور المكونة للقشرة الأرضية، بينما تمثل الصخور الرسوبية 5% منها، غير أن الصخور الرسوبية تغطي 75% من مساحة الأرض فقط مقارنة بالصخور النارية التي تغطي نحو 25% منها (شكل 4.3). ونعرض فيما يلي وصفاً تفصيلياً لكل نوع من الأنواع.

1. الصخور النارية

تتكون الصخور النارية *igneous rocks* (مشتقة من كلمة *ignis* أى نار باللاتينية) من تبلور مادة الصهارة أو الماجما *magma* (والماجما كلمة يونانية تعنى الجسم اللدن). والصهارة هي مادة صخرية منصهرة كلياً أو جزئياً ثقيلة القوام لزجة، توجد في أعماق بعيدة تحت سطح القشرة الأرضية أو في الوشاح العلوى، حيث تصل درجة الحرارة إلى 700° مئوية أو أكثر، وهي درجة حرارة تكفي لصهر معظم الصخور. وعندما تبدأ الصهارة في التبرد التدريجي في باطن الأرض، تتكون بلورات صغيرة ميكروسكوبية الحجم. وعندما تصل

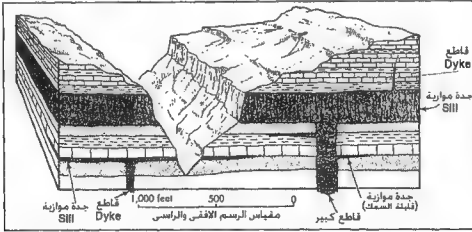


شكل (1.3): تتكون الصخور النارية عندما تصعد الصهارة إلى سطح الأرض وتبرد بسرعة لتكوّن رماذاً بركانياً دقيقاً أو لابة من بلورات دقيقة. ويكون الصخر المتكوّن دقيق النسيج أو يميز بنسيج زجاجي (مثل البازلت أو الأنديزيت) وتتلور الصخور النارية المتداخلة عندما تتداخل الصهارة في الصخور المحيطة المتواجدة تحت سطح الأرض. ويؤدي التبريد البطيء إلى تكوّن صخر خشن النسيج (مثل الجرانيت).

درجة حرارة الصهارة إلى أقل من درجة الانصهار ، البلورات بها إلى نوعين هما الصخور النارية المتداخلة تنمو بعض هذه البلورات ليصل قطرها إلى عدة والصخور النارية المنبتقة :
مليمترات أو أكثر مكوّنة صخرًا ناريًا خشن أ. الصخور النارية المتداخلة: ويطلق عليها أحيانا النسيج coarse-grained (شكل 1.3). ولكن الصخور البلوتونية plutonic rocks. وتتكون الصخور النارية المتداخلة intrusive igneous rocks نتيجة التبلور البطيء لصهارة تداخلت في الصخور الموجودة تحت سطح الأرض ، والتي يطلق عليها صخر الإقليم أو صخر المنطقة country rock. وتتميز الصخور النارية المتداخلة عادة بكبر حجم بلوراتها المتشابكة (المعشقة) ، والتي نمت ببطء نتيجة التبريد التدريجي للصهارة.

وبدأت بسرعة باسم الصخور النارية المنبثقة **extrusive igneous rocks** ، والتي تعرف أيضا بالصخور البركانية **volcanic rocks** . وتتميز هذه الصخور بنسيجها الزجاجي **glassy** أو النسيج دقيق التحبب **fine-grained** . وتتكون الصخور النارية المنبثقة بالبركان **volcanism** ، وهى العملية التى تصعد بالصهارة وما يصاحبها من فئات صلب وغازات إلى سطح الأرض والغلاف الجوى لتكوّن البراكين **volcanoes** . وقد تتكون هذه الصخور من لابة **lava** تتدفق مثل السوائل لمسافات على سطح الأرض قبل أن تتصلب ، أو من حبيبات رماد تبلورت تقريبا في الحال عندما اندفعت عاليا في الغلاف الجوى عند ثوران بركان ما . وقد تتساقط المواد البركانية من أفواه البراكين الشائرة ككتل أو ككرات أو قطع صغيرة أو كرماد بركانى ، أو حتى كإداة سائلة تتجمد قبل أن تسقط على الأرض . وقد

وتعرف كل أجسام الصخور النارية المتداخلة ، بغض النظر عن شكلها أو حجمها بالبلوتونات **plutons** . وتشمل البلوتونات الصغيرة كلا من القواطع والجدد الموازية (شكل 2.3) . والقاطع **dyke** هو جسم شبه صفائحي منضدى الشكل من الصخور النارية ، يقطع طبقات الصخور التى يتداخل فيها . أما الجدة الموازية **sill** فهى جسم شبه صفائحي منضدى الشكل من الصخور النارية التى تتواجد موازية لطبقات الصخور المحيطة التى تداخلت فيها . أما الباثوليث فهو أكبر أنواع البلوتونات . والباتوليث **batholith** جسم نارى متداخل غير منتظم الشكل يقطع طبقات الصخور التى يتداخل فيها (شكل 12.4) ، وقد تزيد بعض الباثوليثات عن 1000 كم طولا و 250 كم عرضا .



شكل (2.3): قواطع **dykes** وجدد موازية **sills** تداخلت في الطبقات الرسوبية تحت سطح الأرض (After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

يتساقط هذا الفتات النارى **pyroclasts** بجوار البركان مكونا جزءا منه ، أو قد ينتشر لمسافات بعيدة بفعل الرياح .

ب. الصخور النارية المنبثقة: تسمى الصخور التى تكونت من صهارة انبثقت فوق سطح الأرض

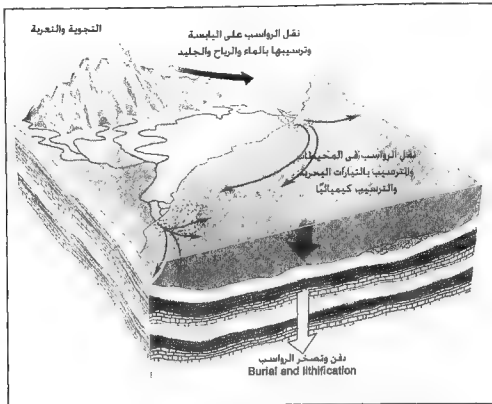
توجد الرواسب **sediments** (مستمدة من **sedimentum** وتعني باللاتينية استقرار أو ترسب) على سطح الأرض على هيئة طبقات، تتكون من حبيبات مفككة مثل: الرمل أو الغرين أو أصداف الكائنات الحية أو غيرها، والتي تتكون منها الصخور الرسوبية بعد تصهرها. وتتكون هذه الحبيبات عند سطح الأرض نتيجة لتجوية **weathering** أنواع الصخور المختلفة النارية أو الرسوبية أو المتحولة. بمعنى أن عمليات التجوية تؤدي إلى تفتت الصخور إلى كسرات مختلفة الأحجام، بالإضافة إلى مواد ذائبة في الماء. وتنقل أجزاء الصخر المتكسر والمواد المذابة، والناشئة عن عملية التجوية، بعوامل التعرية **erosion** المختلفة (وهي مجموع العمليات التي تتفكك بها التربة والصخور وتحركها إلى أسفل التلال والمنحدرات أو إلى مجارى المياه) حيث ترسب على هيئة طبقات من الرواسب (شكل

تكوّن معادن السيليكات معظم المعادن المكوّنة للصخور النارية، ويرجع السبب في ذلك إلى أن الصهير يحتوي على نسبة عالية من عنصر السيليكون والأكسجين وهما يكوّنان أكثر من 70٪ من عناصر الصهير. كما أن عديداً من معادن السيليكات وقليلاً من معادن الأكاسيد تصهر عند درجات الحرارة والضغط المميزة للأجزاء السفلية من القشرة الأرضية والوشاح. وتشمل معادن السيليكات الشائعة المتداخلة في الصخور النارية الكوارتز والفلسبار والميكسا والبيروكسين والأمفيبول والأوليفين، وهي تبلور على هيئة بنات بلورية مختلفة. وهذا العدد المحدود من معادن السيليكات هو المسئول عن تكوين ما يزيد على 90٪ من الصخور النارية. ويوضح جدول (1.3) بعض أنواع الصخور النارية الشائعة.

جدول 3-1: بعض الصخور النارية الشائعة

المجموعة	نوع الصخر	تركيب الصخر
صخور نارية متداخلة ¹ Intrusive	جراتيت Granite	معادن فلسية فاتحة اللون، تشمل أساساً: الكوارتز، وفلسبار بوتاسي وفلسبار البلاجيوكليس الصودي والميكسا.
	ديوريت Diorite	معادن البلاجيوكليس والمهورنبلند وبعض البيوتيت والبيروكسين.
	جابرو Gabbro	معادن مافية تشمل: البيروكسين والأوليفين، بالإضافة إلى فلسبار البلاجيوكليس الكلسي.
	بريدوتيت Peridotite	معادن البيروكسين والأوليفين.
صخور نارية منبثقة ² Extrusive	ريوليت Rhyolite	نفس التركيب المعدني للجراتيت
	أنديزيت Andesite	نفس التركيب المعدني للديوريت
	بازلت Basalt	نفس التركيب المعدني للجابرو

- 1) صخور بردت تحت سطح الأرض، وتتميز المعادن المكونة للصخر بأنها خشنة التحبب، ويمكن رؤيتها بالعين المجردة.
- 2) صخور بركانية بردت فوق سطح الأرض، وتتميز المعادن المكونة للصخر بأنها دقيقة التحبب، ولا يمكن تمييزها بالعين المجردة، وقد تحتوي على مواد غير متبلورة (زجاج).



شكل (3.3): تؤدي التجوية weathering إلى تفتت الصخور إلى كسرات مختلفة الأحجام ، تحملها التعرية erosion إلى أسفل التلال والمجاري المائية لترسب على هيئة طبقات من الرواسب ، وتتكون الرواسب الأخرى بالترسيب الكيميائي وعندما تترامم الطبقات وتدفن على أعماق أكبر، فإنها تتصخر وتكون صخوراً رسوبياً صلباً .
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

3.3). وتؤدي عمليتا التجوية والتعرية إلى تكون نوعين من الرواسب ، هما:

أ. الرواسب الفتاتية

كميات ضخمة من الرمال وغيرها من الرواسب الأديق حجباً لأماكن بعيدة حيث ترسب. أما المثالي فإنها تنقل وترسب كميات كبيرة من المواد الصخرية مختلفة الأحجام. ويعكس التركيب المعدني للرواسب طبيعة المواد الأصلية التي نتجت عنها هذه الرواسب . كما تدل الاختلافات بين الطبقات المتتالية على التغيرات التي حدثت عبر الزمن الجيولوجي .

ب- الرواسب الكيميائية والحيوية

chemical and biochemical sediments

الرواسب الكيميائية والحيوية chemical

and biochemical sediments هي مواد كيميائية

تشمل أيونات : الصوديوم والبوتاسيوم والكالسيوم

تتكون الرواسب الفتاتية clastic sediments (اشتقت كلمة فتاتية clastic من الكلمة اليونانية klastos بمعنى مكسر أو مفتت) من قطع صخرية متكسرة وحبيبات مفككة ومرتبة بفعل عوامل طبيعية مثل : المياه الجارية أو الرياح أو الجليد ، حيث تعمل هذه العوامل على تقليل حجم القطع الصخرية وترسيبها في مناطق جديدة . فالمياه الجارية تنقل الرواسب إلى البحيرات أو البحار والمحيطات لترسب فيها ، كما يمكن للرياح أن تنقل

حجم الرواسب ومساميتها تحت تأثير وزن مايعلوها من رواسب ليعطى كتلة أكبر كثافة من الكتلة الأصلية.
■ التلاحم (السمتة) cementation حيث تترسب المعادن حول الحبيبات المترسبة وتلحمها مع بعضهم البعض .

وتتم عملية الكبس والالتحام بعد الدفن تحت تأثير الطبقات المضافة من الرواسب. وهكذا يتكون الحجر الرملى نتيجة تصخر حبيبات الرمل ، والحجر الجيري نتيجة التلاحم أصداف الحيوانات وحبيبات كربونات الكالسيوم.

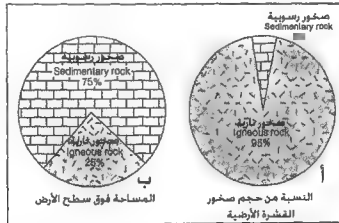
وتتميز الرواسب والصخور الرسوبية بخاصية التطبيق bedding ، أى تكون طبقات متوازية نتيجة هبوط الجزيئات إلى قاع البحر أو النهر أو سطح الأرض. وقد يعكس التطبيق تغيراً في التركيب المعدنى مثلاً يتطابق حجر رملى مع حجر جبرى ، أو تغيراً في النسيج كما يتطابق حجر رملى خشن التحبب مع آخر دقيق التحبب.

والماغنسيوم والكلوريد والفلوريد والكبريتات والفوسفات ، تكونت إما بالترسيب من الوسط الذى ذابت فيه مكونات الصخور أثناء التجوية ونقلها إلى مياه الأنهار أو البحار ، أو استخرجتها كائنات حية من المحاليل التى ذابت فيها . فالكالسيت ($CaCO_3$) قد يرسب من المياه الدافئة ، حيث يترسب ليكون الحجر الجيري ، كما تزيل الشعاب المرجانية والرخويات والطحالب كربونات الكالسيوم من محاليلها . كما يترسب الهاليت (كلوريد الصوديوم) وغيره من الأملاح سريعة الذوبان من المسطحات المائية المغلقة بالتبخير .

ج. التصخر

التصخر lithification هو تحول الراسب غير المتماسك إلى صخر صلد. وتحدث هذه العملية بطريقتين هما:

■ الكبس (الاندماج) compaction حيث ينقص



شكل (4.3): نسب الأنواع المختلفة من الصخور . الكميات النسبية للصخور النارية والرسوبية (أما الصخور المتحولة فإنها تعتبر إما رسوبية وإما نارية طبقاً لأصلها).

تكون الصخور النارية والمتحولة معظم القشرة الأرضية (أ) ، بينما تغطي الصخور الرسوبية والرواسب معظم سطح الأرض وقاع المحيط، حيث إنها تكون طبقة رقيقة موزعة فوق تلك الصخور (ب) .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

جدول 2-3: بعض الصخور الرسوبية الشائعة

الراسب	نوع الصخر	وصف الصخر
فتاتية (يتكون من فتات صخرى أو معدني)	كونجلومرات Conglomerates	يتكون من تلاحم حبيبات من صخور صلبة من مختلف الأحجام، ويزيد حجمها عموماً عن 2 مم.
	حجر رمل Sandstone	حبيبات رمل متلاحمة (2 مم - 0.062 مم).
	حجر الغرين Siltstone	يتكون من حبيبات في حجم الغرين (0.062-0.0039 مم)
	حجر الطين Mudstone	يتكون من حبيبات الغرين والصلصال. صخر كتلي به تطبيق ضعيف أو لا يوجد تطبيق على الإطلاق.
	حجر الطفل Shale	يتكون من الغرين والصلصال، ويتكسر بسهولة على امتداد مستويات التطبيق.
كيميائية حيوية Bioclastic	الحجر الجيري العضوي Limestone	يتكون نتيجة ترسيب كربونات الكالسيوم (كالكسيت، أراجونيت) من المحاليل الجيرية أو من إفراز الكائنات العضوية كأصداف لها.
	التشert Chert	يتكون من السيليكا SiO_2 التي تفرزها الكائنات الحية على هيئة أصداف أو حبيبات دقيقة جداً من سيليكات غير متبلورة، ويتميز بصلادته الشديدة وإمكانية تهذيبه.
	الصخور العضوية Organics	مثل الخث peat الذي قد يتحول إلى فحم. أما الزيت oil والغاز gas فهى مواد لا تصنف عادة مع الصخور الرسوبية، ولكنها تتكون نتيجة عمليات تحدث بعد الترسيب لمادة عضوية في مسام الصخور الرسوبية.
	الحجر الجيري Limestone	كربونات الكالسيوم (كالكسيت - أراجونيت) يترسب مباشرة من ماء البحر بطريقة غير عضوية.
كيميائية Chemical	حجر الدولوميت Dolostone	يتحول الكالكسيت أو الأراجونيت إلى دولوميت $CaMg(CO_3)_2$ بعد الترسيب نتيجة إضافة أيونات ماغنسيوم من ماء البحر الذى يتخلل الرواسب.
	متبخرات Evaporites	تتكون من رواسب وصخور رسوبية كيميائية تكونت نتيجة تبخر ماء البحر أو البحيرات، أو نتيجة تبلور كلوريد الصوديوم (الحاليت)، وكبريتات الكالسيوم (الجبس والأهيدريت) واتحاد أيونات أخرى شائعة في ماء البحر.

وعلاقة الطبقات ببعضها ولون وتركيب الطبقات وآثار سقوط الأمطار بعض الشواهد التي توجد في الصخور الرسوبية، وتستخدم في استنتاج تتابع الأحداث والمناخات القديمة.

وتغطي الصخور الرسوبية معظم سطح الأرض اليابس، وكذلك قيعان البحار والمحيطات. وعلى الرغم

وتقدم لنا الصخور الرسوبية معلومات وفيرة عن تاريخ الأرض خلال النصف بليون سنة الأخيرة من عمرها، بسبب ما تحتويه من حفريات fossils، والتي تمثل بقايا الحياة القديمة النباتية والحيوانية المحفوظة في ثنايا الصخور. وتمثل الطريقة التي تتكسر بها الحبيبات وطريقة ترسيبها

من أن معظم الصخور الموجودة فوق سطح الأرض هي صخور رسوبية ، إلا أنها تكون طبقة رقيقة فوق الصخور النارية والمتحولة ، والتي تمثل الحجم الرئيسى للقشرة الأرضية (شكل 4.3).

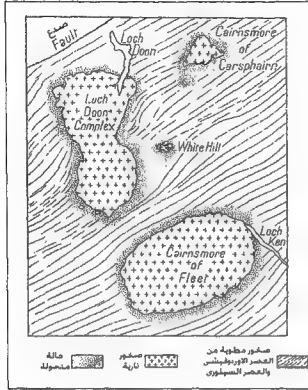
د. الصخور الرسوبية الشائعة

أ. التحول الإقليمي والتحول التماسي (الحرارى)

قد يحدث التحول في منطقة محدودة من الأرض ، كما يحدث على نطاق واسع . فعندما يمتد تأثير الحرارة والضغط العاليين على مسافات واسعة من القشرة الأرضية تصل إلى عشرات الآلاف من الكيلومترات المربعة ، فإن الصخور تتعرض للتحول الإقليمي regional metamorphism . وهو نوع من التحول يصاحب عمليات اصطدام الألواح التى تسبب بناء الجبال ، وطى وكسر طبقات الصخور الرسوبية ، والتى كانت يوما ما أفقية . كما أن هناك نوعا آخر من التحول يحدث إذا كانت درجات الحرارة محدودة وتؤثر في مساحات أصغر من الأرض يعرف بالتحول التماسي contact metamorphism . ويحدث التحول التماسي نتيجة لتأثير درجات الحرارة الناتجة عن تداخل جسم نارى في الصخور المحيطة ، ولذلك يسمى أيضا بالتحول الحرارى thermal metamorphism (شكل 5.3) .

III. الصخور المتحولة

اشتق اسم الصخور المتحولة metamorphic rocks من كلمتين يونانيتين meta بمعنى تغير morph بمعنى شكل ، وهكذا فإن المصطلح يعنى تغير الشكل . وتتكون الصخور المتحولة عندما تسبب درجات الحرارة العالية والضغط المرتفعة في أعماق الأرض في تغير التركيب المعدنى أو النسيج أو التركيب الكيميائى لأى نوع من صخور سابقة (نارية أو رسوبية أو متحولة) ، حيث يساعد وجود الماء أو المحاليل المائية على إتمام عملية التحول .



شكل (5.3): يحدث التحول التماسي في مساحة محدودة حول أجسام نارية متداخلة، منطقة جبالوى - جنوب غرب أسكتلندا. لاحظ وجود هالة متحولة metamorphic aureole حول الجسم الناري .
(After Holmes, D.L., 1984: Holmes Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson, Great Britain).

أسطحها المستوية أو محاورها الطويلة في اتجاه عمودى على اتجاه تأثير هذه القوة . وينتج عن هذا تكون صخر متورق ، حيث تتلون الراقات بألوان المعادن التى تكوّنها . فالإردواز slate صخر متورق دقيق التجنب ، والفليت phyllite صخر متورق خشن التجنب ، بينما يكون الشست schist أكثر خشونة ، ويكون الناييس gneiss هو الأخشن على الإطلاق . أما الأنسجة الحبيبية granular textures والتى تحسوى على بلورات متساوية الأبعاد ، فهى تتكون في الصخور التى تتعرض لضغوط متساوية من كل الاتجاهات ، أو لا يوجد بها معادن لها سلوك نمو في اتجاه محدد ، وبالتالي لا يوجد بها تورق . وتكون الأنسجة الحبيبية أكثر شيوعا في الصخور المتحولة بالتلاص مثل الرخام marble . وقد تظهر الأنسجة الحبيبية في القليل من

ب. الصخور المتحولة الشائعة

معادن السيليكات هى أكثر المعادن شيوعا في الصخور المتحولة ، حيث تكونت هذه الصخور أصلا من تحول صخور أخرى كانت غنية بالسيليكات. والمعادن المميزة في الصخور المتحولة هى : الكوارتز والفلسبارات والميكا والبيروكسين والأفيول ، وهى المعادن المميزة نفسها للصخور النارية . ولكن هناك معادن سيليكات أخرى مميزة للصخور المتحولة فقط ، وهى معادن الكيانيت والاشتوروليت وبعض أنواع الجارنت. وتتكون هذه المعادن في القشرة الأرضية تحت ضغط وحرارة عاليين . وهذه المعادن لا توجد في الصخور النارية ، ولذلك فإن وجودها دليل جيد على حدوث عملية التحول. كما يعتبر

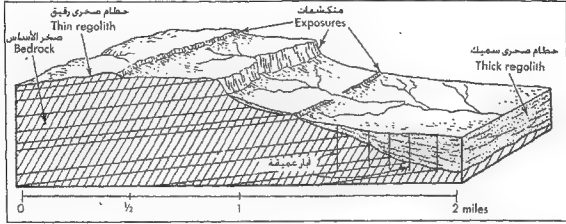
جدول 3-3: بعض الصخور المتحولة الشائعة

النسيج	اسم الصخر	وصف الصخر
متورق Foliated (المعادن الصفائح مرتبة في مستويات متوازية)	إردوار Slate	يتكون نتيجة تعرض صخر الطفل للحرارة والضغط ، ويتميز بوجود معادن مسطحة ومستطيلة لا يمكن تعرفها بالعين المجردة ، ويفصل الصخر إلى ألواح مسطحة صلبة.
	شست Schist	يتكون نتيجة تعرض الصخور لدرجات حرارة وضغط عالي ، ويتميز بوجود معادن مستطيلة ومسطحة (كلوريت ومسكوفيت وبيوتيت) تزيد نسبتها عن 50% ، ويمكن رؤيتها بالعين المجردة ، ويتكسر الصخر إلى أجزاء متموجة.
	نيس Gneiss	يتكون نتيجة تعرض صخور رسوبية فتاتية أو صخور نارية متداخلة للحرارة والضغط ، ويتميز بوجود شرائط أو تجمعات من معادن فاتحة اللون (كوارتز وفلسبار) تتبادل مع أخرى من معادن مستطيلة أو مسطحة (الميكأ أو الأمفيبول) .
حببي (غير متورق) Granular (فسيفساء من معادن متساوية الأبعاد تقريباً مثل المكعبات)	رخام Marble كوارتزيت Quartzite	ينشأ نتيجة تحول الحجر الجيري وحجر الدولوميت بالحرارة ، ويتكون معظمه من الكالسيت أو الدولوميت ، ويتراوح حجم الحبيبات فيه من دقيقة إلى خشنة . صخر شديد الصلادة ، ينشأ عن التحول الحراري لحجر رملي غني بالكوارتز ، ويتكسر الصخر عبر حبيبات الكوارتز وليس عبر المادة اللاصقة للحبيبات ، وقد توجد نسبة شوائب من الحديد أو غيره تعطى الصخر لونا مائلاً إلى الحمرة أو أى لون آخر.

ويقوم الجيولوجي بعمل خريطة تبين توزيع الصخور الموجودة في منطقة ما على السطح ، ثم يحاول فهم تاريخها الجيولوجي من دراسة التنوع الحالي للصخور بها ، وعلاقة هذه الصخور ببعضها البعض وتوزيعها .

IV. تواجد الأنواع المختلفة للصخور

لا تتواجد الصخور في الطبيعة كأجسام منفصلة عن بعضها البعض ، بمعنى أن يكون هناك صخر ناري هنا ورسوبي هناك وصخور متحولة في مكان آخر . بل على العكس من ذلك تتواجد الصخور المختلفة في منطقة ما مختلطة مع بعضها بغير نظام ، وفي تسلسل زمني يعكس تاريخها الجيولوجي .



شكل (6.3): علاقة مواد الصخر المفكك بصخر الأساس bedrock الصلب ، والتي توجد دائما في المناطق الرطبة التي تتميز بتضاريس غير منتظمة وتربة وفيرة . ويتغير سمك الحطام الصخري regolith من صفر إلى مئات الأمتار ، أما صخر الأساس فيوجد دائما تحت السطح ، ويمكن الوصول إليه من خلال الآبار العميقة التي تخترق الأجزاء السميكة من الحطام الصخري ، كما يتكشف صخر الأساس عند الجروف الحادة .
(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

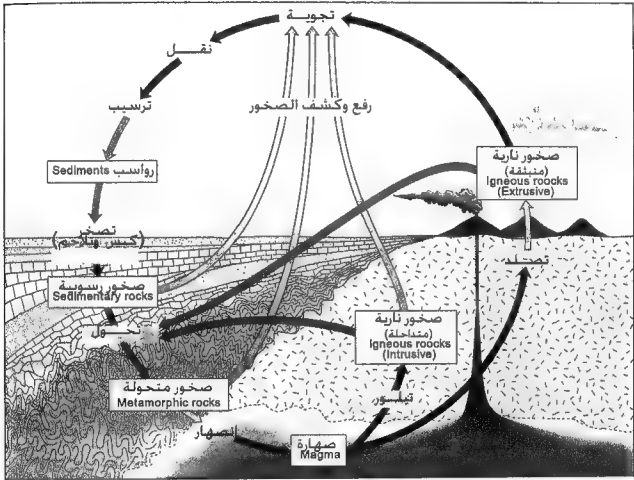
القارات أثناء البحث عن البترول والماء والمعادن ذات القيمة الاقتصادية ، قد أمدتنا بمعلومات وفيرة عن هذه الصخور أيضا . وقد اخترق الجزء الأكبر من هذه الآبار أجزاء ضحلة من القشرة الأرضية ، والتي تتكون في معظمها من الصخور الرسوبية . ومع مواصلة الحفر لأعماق أكبر ربما تتراوح بين 6 و 10 كم فإن الآبار ستخترق صخورا نارية ومتحولة . ومن أجل الحصول على نتائج أكثر عن الأجزاء العميقة من القشرة الأرضية قامت العديد من الدول بها فيها الولايات المتحدة الأمريكية وألمانيا وروسيا بحفر آبار إلى أعماق كبيرة على القارات . ويصل عمق أكبر بئر في روسيا إلى أكثر من 12 كيلومترا ، وهو عمق يفوق أى عمق بئر تجارية تم حفرها .

وستقدم هنا وصفا لدورة واحدة ، آخذين في الاعتبار أن مثل تلك الدورات تتغير زمانا ومكانا . فإذا بدأنا بالصهارة الموجودة في أعماق الأرض حيث تكون الحرارة والضغط مرتفعين لدرجة تكفى لصهر أى نوع من الصخور الموجودة سابقا ، سواء كانت نارية أو متحولة أو رسوبية (شكل 7.3) . وقد سمي جيمس هاتون هذا النشاط في أعماق القشرة الأرضية باسم حدث بلوتوني plutonic episode نسبة إلى بلوتو Pluto الإله الروماني لعالم ما تحت الأرض . والان فإننا نسمى كل الصخور النارية المتداخلة intrusive rocks بالصخور البلوتونية (المسحقة) plutonic rocks . وعندما

٧ . دورة الصخور

تعرف دورة الصخور rock cycle بأنها مجموعة العمليات الجيولوجية التي يتكون بها أى من

تنصهر الصخور السابقة فإن محتوياتها من المعادن قد تنصهر كلياً أو جزئياً، وتصبح كل عناصرها الكيميائية متجانسة في المحاليل الساخنة المتكونة منها، وتكوّن ما يعرف بالصهارة. وعندما تبرد الصهارة تبدأ بلورات معادن جديدة في النمو لتكوّن الصخور النارية الجديدة، وتعرف هذه العملية بالتبلور **crystallization**. وقد يحدث التبلور تحت سطح الأرض، كما سبق أن ذكرنا، ليكون الصخور النارية المتداخلة، أو بعد انبثاق بركان فوق سطح الأرض ليكون الصخور البركانية.



شكل (7.3): دورة الصخور **rock cycle**. وهي توضح العلاقة بين العمليات الداخلية في الأرض وخارجها، وكيف أن كل نوع من أنواع الصخور الثلاثة مرتبط بالآخرين.

تبرد الصهارة وتتصلب لتكوّن صخوراً نارية **Igneous rocks**. وتتكرس وتحلل الصخور المكشوفة فوق سطح الأرض نتيجة التجوية لتكوّن رواسب، تنقل وترسب وتتصلب لتكوّن الصخور الرسوبية **sedimentary rocks**. ومع زيادة عمق الدفن تزيد درجة الحرارة والضغط، مما يؤدي إلى تحول الصخور وتكوّن الصخور المتحولة **metamorphic rocks** أو انصهارها أو كليهما، ثم ترتفع الصخور أثناء عمليات بناء الجبال والنشاطات البركانية، لتعيد الدورة مرة أخرى..... وهكذا.

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

أخرى تكونت من المواد الذائبة في مياه البحار مثل معادن كربونات الكالسيوم .

ويتم دفن هذه الرواسب التي تراكمت في البحار ، وأيضاً تلك المترسبة بالماء أو الرياح على اليابسة ، تحت طبقات متتابعة من الرسوبيات حيث تنصهر تدريجياً لتتحول إلى صخر رسوبي . ويصاحب عملية دفن الصخور عملية هبوط **subsidence** ، وهي انخفاض أو غوص جزء من القشرة الأرضية . وباستمرار عملية الهبوط تضاف طبقات أخرى من الرسوبيات ، وتتحول الرواسب في النهاية إلى صخور رسوبية .

ويؤدي دفن الصخور الرسوبية المتصلة في أعماق القشرة الأرضية إلى رفع درجة حرارتها . وعندما يزيد عمق الدفن عن 10 كم ترتفع درجة الحرارة إلى أكثر من 300°م وتبدأ المعادن التي مازالت في الحالة الصلبة في التحول إلى معادن أكثر استقراراً عند درجات الحرارة والضغط العالية ، وتتحول بالتالي الصخور الرسوبية السابقة إلى صخور متحولة جديدة . ومع زيادة التسخين قد تنصهر الصخور وتكون صهارة جديدة ، حيث تبلور منها صخور نارية باذنة الدورة من جديد .

وعادة لا تكمل هذه الدورة بالتسلسل الذي سبق وصفه . حيث يمكن أن يرفع خلال عملية التجبل أي نوع من الصخور متحولاً أو رسوبياً أو نارياً لتتم تجويته وتعريته ليكوّن رواسب جديدة . كما يمكن تجاوز بعض المراحل ، حيث يمكن أن ترفع الصخور الرسوبية لتتم تعريتها دون أن تتعرض للتحول أو الانصهار . كما يمكن أن تحدث الدورة بترتيب مختلف عن ذلك الذي سبق عرضه ، مثل تعرض الصخر الناري المتكوّن في باطن

وتتكون الصخور النارية أساساً على حدود الألواح التكتونية المتباعدة والمتقاربة . كما تتكون الصخور النارية أيضاً نتيجة بلومات **plumes** الوشاح (البلوم تيار صاعد يحمل الحرارة والمعادن المنصهرة جزئياً من الأجزاء السفلى من الوشاح إلى الأجزاء العليا) . ويمرّز البعض النشاط البركاني داخل الألواح بعيداً عن حوافها إلى هذه البلومات .

وتصعد الصخور النارية المتكونة عند حواف الألواح المتصادمة ، مع الصخور الرسوبية والمتحولة المصاحبة لتكوّن سلسلة من الجبال العالية ، حيث يصبح جزءاً من القشرة الأرضية مشوهاً ومنضغطاً . ويطلق الجيولوجيون على هذه العملية والتي تبدأ باصطدام الألواح وتنتهي ببناء الجبال بالتجبل (نشأة الجبال) **orogeny** . وتعرض هذه الصخور المرفوعة لعملية التجوية والتغير الكيميائي ، بسبب انتقالها إلى وسط أكثر برودة ورطوبة عن باطن الأرض الساخن الذي نشأت به . فمثلاً تتكون أكاسيد الحديد من معادن الحديد ، وتغير بعض المعادن المتكونة في درجات حرارة عالية مثل الفلوسبارات إلى معادن الطين ، كما تذاب بعض المواد مثل معادن البيروكسين تماماً حين تتساقط عليها الأمطار . كما تؤدي تجوية الصخور النارية أيضاً إلى تكوين أحجام وأنواع مختلفة من الحطام الصخري والمواد الذائبة والتي تحمل بعيداً بعوامل التعرية . بينما يتم نقل البعض الآخر بالشلح أو بمياه المجارى المائية والرياح إلى الأنهار ثم إلى المحيطات ، حيث تترسب كطبقات من الرمل والغرين ، أو كرسوبيات

الأرض للتحول، قبل أن يرفع. فقد لوحظ أثناء حفر الآبار العميقة، أن بعض الصخور النارية الموجودة على بعد عدة كيلومترات داخل القشرة الأرضية لم ترفع أبداً، وبالتالي لم تتعرض للتجوية والتعرية.

ومما تجدر الإشارة إليه أن دورة الصخور لا تنتهى أبداً، فهي تحدث دائماً في مراحل مختلفة وفي أماكن مختلفة من العالم، حيث تتكون الجبال ويتم تعريضها في مكان ما، وتتراكم وتدفن الرواسب الناتجة في مكان آخر. وعموماً فإن الصخور التي تكونت الجزء الصلب من الأرض تتعرض للمراحل المختلفة من الدورة باستمرار، حيث نشاهد فقط بعض مراحل هذه الدورة على سطح الأرض، ولكننا نتوقع حدوث المراحل الأخرى في أعماق القشرة الأرضية والوشاح، بناءً على ما نشاهده من الأدلة غير المباشرة.

أ. دورة الصخور وتكتونية الألواح

عندما اقترح جيمس هاتون دورة الصخور لأول مرة لم تتوافر لديه وقتها سوى معلومات قليلة عن العمليات التي يتكون بها أحد الصخور من النوعين الآخرين، رغم وجود أدلة على ذلك. وفي الحقيقة، فإن الدورة الكاملة للصخور لم تتضح إلا منذ عهد قريب، بعد ظهور نظرية تكتونية الألواح.

ويمكن شرح الطريقة التي ترتبط بها دورة الصخور مع تكتونية الألواح مما يحدث عند حدود الألواح المتقاربة (شكل 8.3). حيث تنشأ الصهارة

بسبب انصهار بعض أنواع الصخور فوق نطاق الاندساس subduction zone، ثم تصعد تلك الصهارة خلال الغلاف الصخري العلوي لأنها أقل كثافة من الصخور المحيطة، وتبلور وتكون الصخور النارية igneous rocks. وقد تبلور بعض الصهارات قبل أن تصل إلى سطح الأرض لتكون الصخور النارية المتداخلة، بينما ينبثق البعض الآخر ويتصلب على سطح الأرض لتكون الصخور البركانية.

فإذا تعرضت الصخور النارية للغلاف الجوى، وبالتالي للتجوية والتعرية، فإن الحطام الصخري والمواد المذابة تنتقل إلى الحواف القارية لتترسب في طبقات قد تصل إلى آلاف الأمتار سمكا. ومع مرور الوقت، فإن طبقات الرواسب تتصخر لتكون وتدا سميكا من الصخور الرسوبية sedimentary rocks يحيط القارات.

وقد يضطرب الهدوء النسبي للنشاط الرسوبي في نهاية الأمر على امتداد الحافة القارية، إذا أصبحت المنطقة عبارة عن حد لوح متقارب. وعندما يحدث ذلك، فإن الغلاف الصخري المحيطي المجاور للقارة يبدأ في الهبوط والاندساس تحت القارة في الغسلات اللدن (الأسثينوسفير). ويؤدي الاندساس على امتداد تلك الحواف القارية النشطة إلى تشوه الرواسب في أحزمة طويلة من الصخور المتحولة metamorphic rocks.

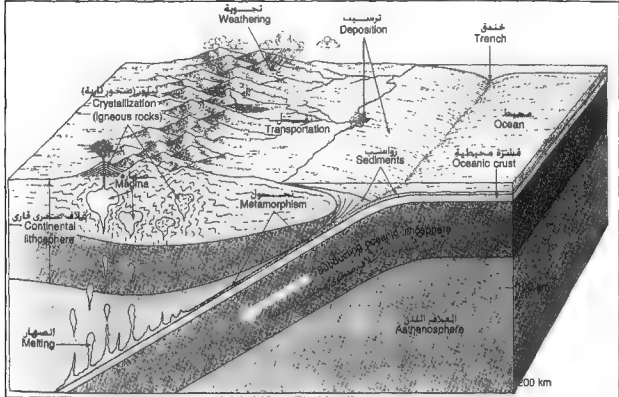
وعندما يستمر اللوح المحيطي في الهبوط، فإن بعض الرواسب التي لم تشوه أثناء تكون الجبال تحمل إلى أسفل في الغلاف الصخري اللدن (الأسثينوسفير) الساخن، حيث تتحول أيضا. وتتسقل في النهاية بعض الصخور

الصخور : سجل العمليات الجيولوجية

الصخر في باطن الأرض تحت الظروف المختلفة من الحرارة والضغط العاليين أو عند سطح الأرض حيث تكون الحرارة والضغط منخفضين.

2. تشمل الصخور ثلاثة أنواع رئيسية هي الصخور: النارية والرسوبية والمتحولة. وتشمل الصخور النارية

المتحولة إلى أعماق أكبر ، حيث ترتفع درجات الحرارة والضغط بدرجة تكفي لأن يحدث انصهارا جزئيا فتتكون الصهارة . وتصدد الصهارة المتكونة حديثا لتتصلد إلى أعلى لتكوّن صخورا نارية . وهكذا تبدأ دورة الصخور من جديد .



شكل (8.3): علانة دورة الصخور بتكتونية الألواح كما يوضحها حد متقارب convergent boundary ، حيث يتدس لوح محيطي تحت لوح قاري .

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition.

الملخص

قسمان هما الصخور النارية المتداخلة ، والتي تتكون تحت سطح الأرض ، وتتميز غالبا ببلورات كبيرة الحجم ، والصخور النارية المنبثقة فوق سطح الأرض ، والتي تتميز بوجود نسيج زجاجي أو دقيق التجبب.

3. تتكون الصخور الرسوبية نتيجة تصخر الرواسب بعد دفنها. وتتكون نتيجة عمليات التجوية والتعرية للصخور المكتشفة عند سطح الأرض.

1. يحدد التركيب المعدني (أنواع ونسبة المعادن المكونة للصخر) والنسيج (أحجام وأشكال وترتيب البلورات أو الحبيبات) نوعية الصخر . وهذان العنصران يحددان الظروف الجيولوجية التي كانت سائدة أثناء تكوّن الصخر. وتشمل تلك الظروف التركيب الكيميائي سواء تكون

بدأنا بتكوين الصخور النارية من الصهارة في باطن الأرض ، فإنه يتم رفعها إلى السطح أثناء عمليات بناء الجبال ، حيث تتعرض عند السطح للتجوية والتعرية ، والتي تؤدي إلى تكوين الرواسب. ثم تعود الرواسب إلى باطن الأرض بالدفن والتصخر لتكوّن الصخور الرسوبية. ويؤدي الدفن في أعماق كبيرة من الأرض إلى التحول أو الانصهار حيث تبدأ الدورة مرة أخرى من النقطتين.

4. تتكون الصخور المتحولة نتيجة التغير في الحالة الصلبة لصخور نارية أو رسوبية أو متحولة أخرى نتيجة تعرضها لدرجات حرارة أو ضغط عالين في باطن الأرض أو كليهما.

5. توضح دورة الصخور العلاقة بين الأنواع الثلاثة الرئيسية للصخور وتكوّنها من بعضها لبعض بالعمليات الجيولوجية التي تنشأ عن طريقها الصخور. ويمكن تعريف الدورة الجيولوجية بأن نبدأ عند أي نقطة في الدورة. فإذا

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

<http://www.prenhall.com/tarbuck>

<http://www.uh.edu/~ibutler/anon/anoncoursepetr.html>

<http://volcano.und.nodak.edu/vwdocs/vwlessons/lessons/Slideshow/Igrock/Igindex.html>

<http://uts.cc.utexas.edu/%7Ermr/index.html>

المصطلحات المهمة

batholith	باثوليث	outcrops	منكشفات
bedding	تطبق	plume	بلوم
bedrock	صخر الأساس	pluton	بلوتون
chemical and biochemical sediments	رواسب كيميائية حيوية	plutonic rocks	صخور بلوتونية (سحيقة)
clastic sediments	رواسب فتاتية	pyroclasts	فتات ناري
contact metamorphism	تحول تماسي	regional metamorphism	تحول اقليمي
country rock	صخر الإقليم (صخر المنطقة)	regolith	حطام صخري (أديم)
crystallization	تبلور	rock cycle	دورة الصخور
dyke	قاطع	sediment	رأسب
erosion	تعرية	sedimentary rocks	صخور رسوبية
extrusive igneous rocks	صخور نارية منبثقة	sill	جدة موازية
igneous rocks	صخور نارية	subsidence	هبوط
intrusive igneous rocks	صخور نارية متداخلة	texture	نسيج
foliation	تورق	volcanic rocks	صخور بركانية
lava	لاية	volcanism	تبركن
lithification	تصخر	weathering	تجوية
magma	صهارة		
metamorphic rocks	صخور متحولة		
orogeny	تجبل (نشأة الجبال)		

الأسئلة

1. ما الفرق بين الصخور النارية المنبثقة والمتداخلة؟
2. ما الفرق بين التحول الإقليمي والتحول التماسي؟
3. ما الفرق بين الصخور الرسوبية الفتاتية والصخور الرسوبية الكيميائية أو الكيميائية الحيوية؟
4. اذكر ثلاثة معادن سيليكاتية تتواجد في كل من الصخور النارية والرسوبية والمتحولة .
5. اذكر أياً من الأنواع الثلاثة الرئيسية للصخور يتكون عند سطح الأرض، وأياً يتكون في باطنها.
6. ما العمليات الجيولوجية التي تحول صخوراً رسوبياً إلى صخر ناري؟
7. اذكر اسم معدن لا يتواجد سوى في الصخور الرسوبية، والذي يمكن استخدامه للتفريق بين صخر رسوبي دقيق التحبب تكوّن من الطين وصخر آخر بركاني .
8. هل تتوقع أن يكون نطاق التحول التماسي حول متداخل تكوّن بواسطة صهارة مرتفعة الحرارة جداً أكبر أم متداخل آخر نشأ من صهارة متوسطة درجة الحرارة؟
9. كيف تشرح تكتونية الألواح النشاط البلوتوني؟

الفصل

4

الصخور النارية

أ. تصنيف الصخور النارية :

أ - النسيج :

1 - الصخور النارية المتداخلة

2 - الصخور النارية المنبثقة (البركانية)

ب - التركيب الكيميائي والمعدني :

1 - الصخور الفلسية

2 - الصخور المتوسطة

3 - الصخور mafic

4 - الصخور فوق mafic

II. كيف تتكون الصهارات ؟ :

أ - كيف تنصهر الصخور؟

ب - تكوّن غرف الصهارة

III. التمايز الصهاري :

أ - سلسلة التفاعل المتصلة

ب - سلسلة التفاعل غير المتصلة

ج - التبلور التجزئي

د - نظرية بوين للتمايز الصهاري

هـ - النظريات الحديثة منذ نظرية بوين

و - التمثيل واختلاط الصهارات

IV. مواضع تكون الصهارات وأنواعها :

1 - أصل الصهارة البازلتية

2 - أصل الصهارة الأنديزيتية

3 - أصل الصهارة الريوليتية

V. أشكال المتداخلات الصهارية :

أ - البلوتونات :

1 - الباثوليثات

2 - الجدد الموازية والقواطع

ب - العروق

VI. النشاط الناري وتكتونية الألواح

الحقلية، ومع بداية القرن التاسع عشر قاموا بإجراء الدراسات العملية على تلك الصخور لتحديد تركيبها الكيميائي والمعدني وتصنيفها، متبعين نفس الطريقة التي نتبعها اليوم اعتماداً على خواص النسيج والتركيب المعدني والكيميائي. وتعد الدراسة الحقلية أمراً مفيداً في تصنيف الصخور النارية أحياناً.

أ. النسيج

صنفت الصخور النارية على أساس النسيج texture منذ نحو مائتي سنة مضت، حيث يُعتبر النسيج وسيلة سهلة وعملية يستخدمها الجيولوجي في الحقل والمعمل لتعرف أنواع الصخور المختلفة. وتعرف الهيئة الناتجة عن الحجم النسبي وشكل وطريقة ترتيب بلورات المعادن المكوّنة للصخر، ودرجة التبلور crystallinity بالنسيج texture. وتقسّم الصخور النارية حسب حجم البلورات إلى صخور خشنة التحبب coarse-grained rocks، مثل الجرانيت، تحتوى على بلورات كبيرة الحجم، يمكن رؤيتها بالعين المجردة، عكس الصخور دقيقة التحبب fine-grained rocks، مثل البازلت، التي تكون بلوراتها صغيرة جداً، إلى الدرجة التي لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة أو حتى بالعدسة المكبرة. ويوضح شكل 1.4 عيتين من صخرى الجرانيت والبازلت مع صور أخذت باستخدام المجهر (الميكروسكوب) للقطاعات الرقيقة الشفافة التي تم عملها في الصخرين، وتعرف بالشرائح الميكروسكوبية thin sections. والفرق في النسيج كان واضحاً للجيولوجيين القدامى، إلا أن تفسير طريقة تكوّن الأنسجة لم يتم إلا من خلال دراسة الصخور البركانية.

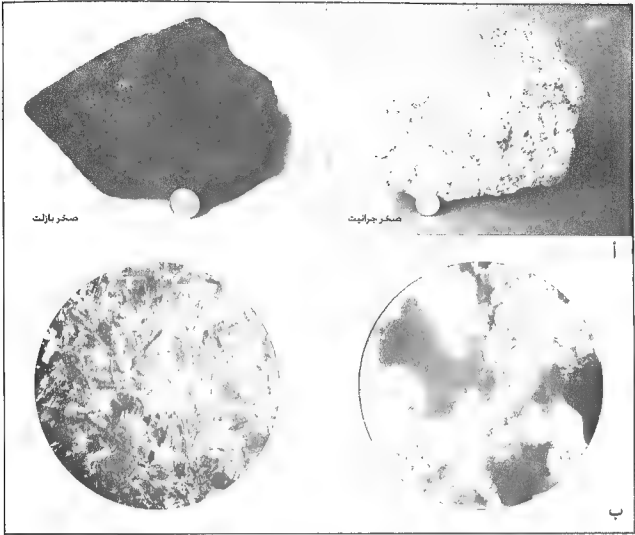
تتكون معظم الصخور النارية من معادن سيليكاتية تبلورت من الصهارة magma عند درجات حرارة تتراوح بين 700°م و 1200°م. وتعتبر الصخور النارية تسجيلاً للتاريخ الحراري للأرض، بالإضافة إلى الدور المهم الذي يلعبه النشاط الناري في نشأة وانتشار قيعان المحيطات ونشأة الجبال والقارات.

وقد أوضحت الدراسات الحديثة أن الصخور تنصهر في بعض الأماكن العميقة الساخنة من القشرة الأرضية والوشاح ثم تندفع المواد المنصهرة نحو السطح. وقد تتصلب بعض الصهارات قبل أن تصل إلى السطح لتكون الصخور النارية المتداخلة، بينما يجترق بعضها الآخر القشرة الأرضية ليتصلب فوق سطح الأرض، ويكون الصخور النارية المنبثقة (البركانية).

وقد تناولنا الصخور النارية في الفصل السابق، عند الحديث عن دورة الصخور، كما سنتناولها أيضاً في الفصل التالي أثناء مناقشتنا لنشاط البراكين وعلاقتها بالصهارات. وفي هذا الفصل سنتناول الصخور النارية من زاوية أكثر شمولاً وتفصيلاً، سواء منها الصخور النارية المتداخلة intrusive igneous rocks أو المنبثقة extrusive igneous rocks، وأيضا العمليات التي تؤدي إلى تكوّنهما.

1. تصنيف الصخور النارية

بدأ الجيولوجيون منذ نهاية القرن الثامن عشر في دراسة الصخور النارية من خلال المشاهدات



شكل (1.4): الفرق في النسيج بين الصخور الخشنة النسيج مثل الجرانيت، والصخور الدقيقة النسيج مثل البازلت.
(أ) عينة لصخر الجرانيت (جرانيت أسوان - مصر) يحتوي على بلورات كبيرة الحجم يمكن رؤيتها بالعين المجردة، وعينة بازلت (الواحات البحرية - الصحراء الغربية - مصر) تحتوي على بلورات صغيرة الحجم.
(ب) صورة لقطاعات رقيقة شفافة في الصخرين السابقين (سمك شريحة الصخر 0.03 مم حيث يمكن أن يتخللها الضوء)، قوة التكبير O X 50.

وقد أتى التوضيح الثاني لمفهوم النسيج في القرن التاسع عشر من خلال الدراسة المعملية لعملية تبلور السوائل الشائعة. فعندما يبرد الماء إلى درجة التجمد، تتبلور جزيئاته وتأخذ أوضاعاً ثابتة في التركيب البنائي للبلورة المتصلبة، ولا تستطيع جزيئاته الحركة بحرية كما كانت تفعل عندما كان الماء سائلاً. وتتبلور كل السوائل الأخرى بهذه الطريقة. كما أوضحت تلك الدراسات أنه

حيث لاحظ قدامى الجيولوجيين أن اللابة lava تبرد بسرعة عندما تنبثق فوق سطح الأرض وتكون صخوراً دقيق النسيج أو صخوراً زجاجية لا يمكن تمييز أي بلورات فيه، بينما إذا بردت اللابة ببطء، كما يحدث في فيض سميك من اللابة يبلغ ارتفاعه عدة أمتار، فإنه تتكون بلورات أكبر حجماً ووسط هذا الفيض السميك.

وخشنة التحبيب . كما توصل الكيميائيون أيضا إلى أن عملية التبلور البطيء تنتج هذا النموذج من البلورات .

وبتقييم هذه الأدلة الثلاثة ، اقترح هاتون أن الجرانيت قد تكون من مادة منصهرة ساخنة تبلورت في أعماق الأرض . وقد توصل الجيولوجيون عند رؤية هذا النسيج المميز للجرانيت في أماكن أخرى من العالم إلى النتيجة نفسها ، وهي أن الجرانيت والصخور الخشنة التبلور coarse-grained rocks المماثلة تكونت من صهارة بردت ببطء في أعماق الأرض .

وكما سبق أن أوضحنا في الفصل الثالث ، فإن الصهارات عبارة عن سوائل معقدة لمواد صخرية منصهرة . وتبلور هذه السوائل نتيجة انخفاض درجة الحرارة أو التغيرات في الضغط أو تغيرات في التركيب الكيميائي . أما إذا بردت الصهارات بسرعة كبيرة ، فإنها تتصلب دون تكوين بلورات . ويشمل الناتج النهائي لعملية التبلور أو التصلب صخورا مكونة من بلورات متشابكة (معشقة) interlocking crystals أو زجاج glass . وعندما تفتت الصهارة نتيجة ثورات (تدفق) انفجاري وهروب الغازات ، فقد تتجمع كسرات من الزجاج أو البلورات أو الصخور لتكوّن راسبا من الفتات الناري pyroclasts . وعندما يتحجر الفتات الناري فإنه يكون صخورا . وبغض النظر عن هذا التاريخ ، فإنه يتكون صخر ناري جديد يتكون من الزجاج أو البلورات أو أجزاء من الزجاج و البلورات والصخور .

وتعرف أنسجة الصخور النارية المكونة من بلورات متشابكة بأنها أنسجة متبلورة crystalline textures ، بينما تعرف أنسجة الصخور المكونة من كسرات بلورية أو صخرية بالأنسجة الفتاتية النارية pyroclastic textures . وتوصف الصخور النارية حسب درجة تبلور crystallinity المعادن المكونة لها بواحد من ثلاثة

إذا تصلب سائل بسرعة كبيرة ، كما يحدث للصهارة عندما تنبثق فوق سطح الأرض ، فإن البلورات لا تجد الوقت الكافي لتنمو لأحجام أكبر ، ويتكون بدلا من ذلك عدد كبير من البلورات الدقيقة ، بينما يعوق التبريد المفاجيء عملية تكون بلورات وتتكون نتيجة لذلك مادة زجاجية .

وقد استطاع الجيولوجيون الأوائل أن يربطوا العلاقة بين الأنسجة الدقيقة التبلور والتبريد السريع على سطح الأرض . كما عرفوا أن الصخور النارية الدقيقة التبلور دليل على تكونها من نشاط بركاني سابق . أما الصخور الخشنة التحبيب ، وفي ظل غياب الملاحظة المباشرة ، فقد افترض الجيولوجيون الدليل على طريقة تكونها .

وقد كان صخر الجرانيت هو الدليل على التبريد البطيء وتكون الصخور الخشنة التحبيب ، حيث لاحظ جيمس هاتون وهو أحد مؤسسي علم الجيولوجيا الحديثة في أواخر القرن الثامن عشر ، أثناء عمله في الحقل في اسكتلندا :

- أن صخور الجرانيت تقطع بعض طبقات الصخور الرسوبية .
- أن صخور الجرانيت تستطيع تشميم الصخور الرسوبية ، كما لو أنها قد اندفعت بقوة في شقوقها على هيئة صهير سائل .
- تختلف معادن الصخور الرسوبية الملامسة للصخور الجرانيتية عن الصخور الرسوبية الموجودة على مسافة أبعد من الجرانيت .

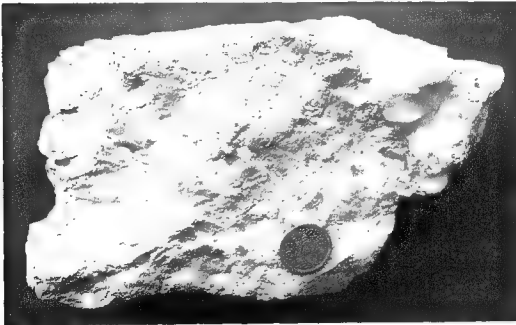
ولذلك فقد توصل هاتون إلى أن التغيرات في الصخور الرسوبية الملامسة للجرانيت لابد أنها نتجت عن حرارة شديدة انبثقت من الجرانيت . كما لاحظ أن الجرانيت يتكون من بلورات متداخلة

grained عندما يكون حجم الحبيبات أقل من 1 مم، ومتوسطة التحبب medium-grained عندما يكون حجم الحبيبات بين 1 مم و 5 مم، وخشنة التحبب coarse-grained عندما يكون حجم الحبيبات بين 5 مم و 3 سم.

كما أن هناك بعض المصطلحات الإضافية التي تستخدم لوصف الصخور ذات حجم مميز، فمثلاً توصف الصخور التي يزيد فيها حجم الحبيبات عن 3 سم طولاً بأنها خشنة التحبب جداً very coarse-grained أو بجائيتية pegmatitic (شكل 2.4). وعلى الرغم من أن كثيراً من الجيولوجيين يفضلون استخدام مصطلح بجائيت للصخور السيليكية (الجرانيتية) ذات حجم البلورات الخشن جداً، فإن هذا المصطلح قد يستخدم لأي صخر تكون بلوراته كبيرة بغض النظر عن تركيبه المعدني.

مصطلحات: فهي إما كاملة التبلور holocrystalline إذا تكونت كلية من مادة متبلورة، أو كاملة الزجاجية holohyaline إذا تكونت كلية من الزجاج، أو ناقصة التبلور hypocrytalline إذا احتوت على بلورات وزجاج معا.

أما بالنسبة لحجم الحبيبات، فيوصف نسيج الصخر الذي لا يحتوي على مواد متبلورة بأنه زجاجي glassy النسيج، وتسمى المواد المتبلورة التي تكون حبيباتها صغيرة (أقل من 2 مم)، بحيث يستخدم الميكروسكوب لتمييزها، بأنها خفية التحبب aphanitic، أما المواد المتبلورة التي يمكن تمييز بلوراتها بالعين المجردة (أكبر من 2 مم) فتوصف بأنها ذات نسيج واضح التبلور phaneritic. وتصنف كل الصخور النارية ذات النسيج واضح التبلور إلى دقيقة التحبب fine-



شكل (2.4): بجائيت يتميز أن حجم الحبيبات فيه يزيد عن 3 سم طولاً - الصحراء الشرقية - مصر .

للمصخور النارية المنبثقة **extrusive igneous rocks**. وتتكون هذه الصخور حينما تنبثق اللابة، أو أى مواد بركانية أخرى من البراكين. لذلك تسمى هذه الصخور أيضا بالمصخور البركانية **volcanic rocks**. وتضم الصخور النارية المنبثقة قسمين رئيسيين هما:

اللابات **Lavas**: وهى صخور بركانية تكونت من اللابة. ويستخدم مصطلح لابة **lava** للدلالة على كل من الصهارة التى تنبثق فوق سطح الأرض، وأيضا على الصخر الذى تصلد منها، وتتراوح هيئتها بين الناعمة **smooth** والجلبية **ropy** والحادة المسننة **jagged** والشائكة **spiky**. ومن المعروف الآن أن عديدًا من هذه الأنسجة الخاصة تعتبر أدلة على الظروف التى تكونت فيها هذه الصخور، والتركيب الكيميائى للصهارة التى تكونت منها، والطريقة التى قذفت بها من البراكين.

المصخور الفتاتية النارية **pyroclastic rocks**: تتكون الصخور الفتاتية النارية أثناء الانفجارات الأكثر عنفا، وذلك حينما تندفع قطع مكسرة من اللابة والبلورات والزجاج عاليًا فى الهواء. ويضم الفتات النارى **pyroclasts** البلورات التى بدأت فى التكون قبل عملية الانفجار وكسرات من لابة تصلدت سابقا، بالإضافة لقطع من الزجاج بردت وتكسرت أثناء عملية الانفجار. ويعتبر الرماد البركانى **volcanic ash** أصغر أنواع الفتات النارى حجما، وهو يتكون من حبيبات متناهية فى الصغر، تتكون عادة من الزجاج الذى تكوّن عند اندفاع الغازات الهاربة من البركان فى صورة رذاذ دقيق الحبيبات من الصهارة. ويتراكم الرماد البركانى على هيئة طبقات مفككة وغير متلاحمة. وتعرف أحيانا الرواسب المتكوّنة من الفتات النارى باسم تفرأ **tephra**. وتسمى كل الصخور البركانية المتكوّنة من هذه المواد الفتاتية النارية بالمصخور الفتاتية النارية **pyroclastic rocks**.

وتعرف الأنسجة البورفيرية **porphyritic** (شكلى 3.4 هو 5.5) بأنها أنسجة تتكون من بلورات كبيرة الحجم فى أرضية **groundmass** من حبيبات أصغر أو فى وسط زجاجى. وتسمى البلورات الكبيرة بالبلورات الظاهرة (فينوكريست) **phenocrysts**، وهى البلورات التى تكونت أثناء وجود الصهارة تحت سطح الأرض، ثم حدث الانفجار البركانى قبل أن تتمكن بقية البلورات المتكوّنة للأرضية من النمو. وعند انبثاق الصهارة إلى سطح الأرض، فإن اللابة تبرد بسرعة وتتحوّل إلى كتلة متبلورة من بلورات ظاهرة وكبيرة الحجم فى أرضية دقيقة التحبب.

ويمكن تقسيم الصخور النارية بناءً على نسيج الصخر أو طريقة التكوين والتواجد فى القشرة الأرضية إلى قسمين رئيسيين، هما: الصخور النارية المتداخلة والمصخور النارية المنبثقة.

1- الصخور النارية المتداخلة

يرتبط نسيج الصخر بسرعة تبرّد الصهارة التى نشأ منها، وبالتالى مكان تبريده. فالتبريد البطيء للصهارة فى باطن الأرض يسمح بالوقت الكافى لنمو بلورات كبيرة متداخلة، والتى تميز الصخور النارية المتداخلة **intrusive igneous rocks**، والتى تعرف أيضا بالصخور البلوتونية (الجوفية) **plutonic rocks**. والصخر النارى المتداخل هو صخر نارى اندفع بقوة فى الصخور المحيطة. كما تعرف الصخور المحيطة بصخور المنطقة أو صخور الإقليم **country rocks**.

2- الصخور النارية المنبثقة (البركانية)

يؤدى التبريد السريع عند سطح الأرض إلى تكوّن النسيج دقيق التحبب أو الزجاجى والمميز

تصنيفها على أساس النسيج أو التركيب المعدني ، يمكن تصنيفها اعتمادا على التحليل الكيميائي . ويعتمد أحد التصنيفات الكيميائية البسيطة للصخور النارية على محتوى الصخور من السيليكا (SiO_2)، حيث تتراوح نسبة السيليكا في معظم الصخور النارية بين 40 و 80٪ وزنا . وتقسّم الصخور النارية حسب نسبة السيليكا التي يحتويها الصخر إلى أربع مجموعات هي: الصخور الحامضية acidic rocks ، والصخور المتوسطة basic intermediate rocks ، والصخور القاعدية ultramafic rocks ، والصخور فوقالقاعدية (جدول 1.4).

كما تقسم الصخور النارية أيضا حسب نسبة محتواها من المعادن السيليكاتية ، اعتمادا على آلاف التحليلات المعدنية التي أجريت في مختلف أنحاء العالم . وتقسّم المعادن السيليكاتية إلى مجموعتين ، أولاهما مجموعة المعادن الفلسية felsic minerals الغنية بالسيليكا ، وتشمل الكوارتز والفلسبار (بنوعيه الأرثوكليز

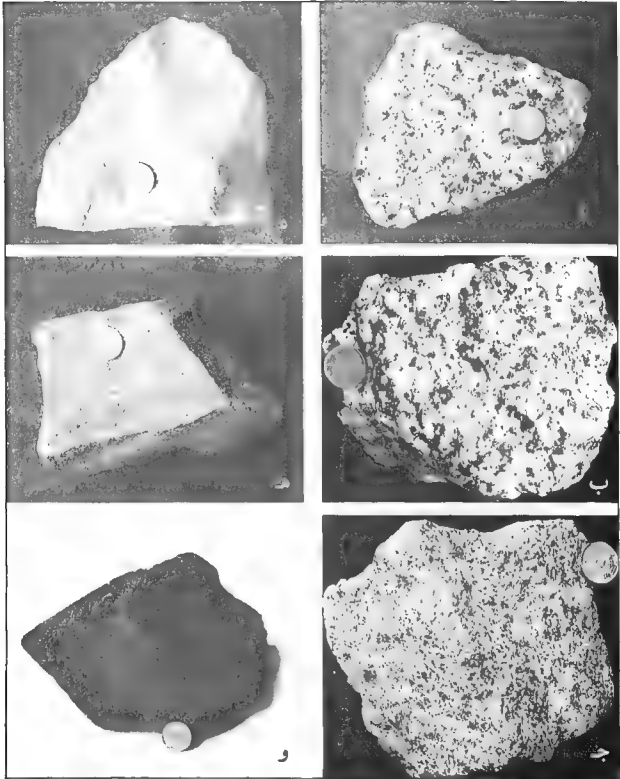
وعندما يكون الزجاج هو المادة الوحيدة المكوّنة للصخر الناري ، فإنه يأخذ عدة أشكال منها البيوميس (الحجر الخفاف) pumice ، وهو عبارة عن كتلة خفيفة بها عديد من الفجوات vesicles أو الثقوب التي نتجت عن هروب الغازات المحبوسة من الصهير المتصلب. ومنها أيضا الأوبسيديان obsidian وهو عكس البيوميس ، حيث لا يحتوي على أى فجوات نتيجة هروب الغازات ، ولذلك يكون صلبا وكثيفا ، ويتميز بمكسره المحاري ، كما يتميز الأوبسيديان المكسور بحوافه الحادة ، ولذلك فقد استخدمه سكان أمريكا الأصلية كـرووس للحراش وأدوات للقطع . وستتناول في الفصل الخامس كيفية تكوّن هذه الصخور والصخور البركانية الأخرى بالتفصيل . وستتناول فيما يلي طريقة أخرى لتصنيف الصخور النارية.

جدول (1.4): تقسيم الصخور النارية حسب نسبة السيليكا

نسبة السيليكا بالوزن (SiO_2 wt%)	اسم المجموعة	الصخور المتبلورة في المجموعة
> 66٪	صخور حامضية Acidic rocks	ريوليت، جرانيت ، جرانوديوريت ، داسيت
52٪-66٪	صخور متوسطة Intermediate rocks	أنديزيت ، كوارتز ديوريت
45%-52%	صخور قاعدية Basic rocks	بازلت ، جابرو
< 45٪	صخور فوقالقاعدية Ultramafic rocks	دونيت ، بريدوتيت

والبلاجيوكليز) ، وثانيتهما مجموعة المعادن المافية mafic minerals الفقيرة في السيليكا ، وتشمل مجموعات الأمفيبول والبيروكسين والأوليفين والميكا الداكنة (بيوتيت) . وتبلور المعادن المافية عند درجات حرارة أعلى من تلك التي تتبلور عندها المعادن الفلسية. وبالتالي تكون المعادن المافية أسبق في

ب. التركيب الكيميائي والمعدني يمكن تصنيف الصخور النارية على أساس التركيب الكيميائي والمعدني ، بالإضافة إلى النسيج . فالزجاج البركاني والذي يكون عديم التبلور تحت المجهر (الميكروسكوب) ، وكذلك الصخور ذات الحبيبات المتناهية الصغر أو الدقيقة التحبب ، والتي يصعب



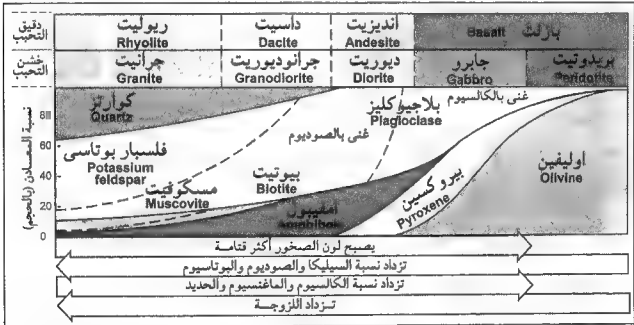
شكل (3.4) . صحور نارية متداخلة intrusive rocks حشنة البلور (يمين الشكل) وأخرى مبنقة extrusive rocks دقيقة البلور (يسار الشكل) لاحظ الفرق في حجم الحبيبات بين مجموعة الصخور المتداخلة ومجموعة الصخور المبنقة ، كما يلاحظ التغير في اللون من الحارثيت (أ) والريوليت (د) وهى صحور فاتحة اللون لغناها بالكوارتز والفلسبار ، إلى الديوريت (ب) والأنديزيت (هـ) ، وهى صحور متوسطة اللون إلى الحامو (ج) والبارلت (و) ، وهى صحور حالبة من الكوارتز وعينة بالبروكسين والأوليفين ، ولذا فهى ذات لون داكن

ومتوازيتين في التركيب المعدني والكيميائي، ولكن يختلفان في النسيج. وبمعنى آخر، فإن التركيب المعدني والكيميائي في معظم الصخور إما أن يكون لصخر متداخل وإما للصخر انبثاقى (بركاني). والاستثناء الوحيد لذلك يكون في الصخور عالية المافية جداً (فوقمافية ultramafic)، مثل صخور الدونيت والبريدونيت، والتي نادراً ما تظهر على هيئة صخور نارية منبثقة.

وتتكون معظم الصخور النارية الشائعة من واحد أو أكثر من معادن السيليكات الستة التالية وهى: الكوارتز والفلسبار (وتضم المجموعة كلا من الفلسبار البوتاسى والبلاجيوكليز)، والميكا (وتضم كلا من المسكوفيت والبيوتيت)، والأمفيبول والبيروكسين والأوليفين، ويوضح شكل (4.4) تصنيف الصخور النارية على أساس المعادن التي تكوّن الصخر ونسبتها

التبلور من المعادن الفلسية عندما تبرد الصهارة. ويمكن استخدام صفات فلسى felsic (من feldspar silica)، ومافى mafic (من magnesium ferric من الكلمة اللاتينية ferrum، بمعنى حديد) لكل من المعادن والصخور الغنية في هذه المعادن.

وقد أظهرت دراسة التركيب المعدني والكيميائي للصخور النارية، أن بعض هذه الصخور المنبثقة والمتداخلة تكون متماثلة في التركيب ومختلفة فقط في النسيج. فمثلاً، البازلت صخر منبثق تكون من لابة، وللجابر التركيب المعدني نفسه للبازلت، إلا أنه تبلور في أعماق القشرة الأرضية. وبالمثل صخرا الديوريت والأنديزيت، وكذلك الريوليت والجرانيت اللذان يتشابهان في التركيب ويختلفان في النسيج (شكل 3.4). وهكذا، تكوّن الصخور المنبثقة والمتداخلة مجموعتين من الصخور النارية متقابلتين



شكل (4.4): تقسيم الصخور النارية على أساس المعادن التي تكوّن الصخر ونسبتها. يلاحظ أن الحدود بين أنواع الصخور متدرجة وليست فجائية، كما هو موضح بالخطوط المشرفة في الجزء العلوي من الشكل. ولمعرفة تركيب أى صخر، نمد الخطوط المشرفة رأسياً لأسفل ثم نقدر نسبة المعادن باستخدام الأرقام الموضحة عند المحور الرأسي. وتسمى الصخور النارية الغنية في الكوارتز والفلسبار بالفلسية felsic والصخور فقيرة اللون بينما تسمى الصخور النارية الغنية في البيروكسين والأمفيبول والأوليفين بالصخور النارية المافية mafic igneous rocks وتكون داكنة اللون.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

الكوارتز وفلسبار الأرتوكليز وفلسبار البلاجيوكليز. وتحتوى معادن فلسبار البلاجيوكليز على كل من عنصرى الكالسيوم والصوديوم. وكما يوضح شكل (4.4)، فالصخور الفلسية تكون أغنى فى البلاجيوكليز الصودى بينما تكون الصخور المافية أغنى فى البلاجيوكليز الكلسى. وإذا أخذنا فى الاعتبار ما سبق ذكره، من أن المعادن المافية يتبلور عند درجات حرارة أعلى من تلك التى يتبلور عندها الصخور الفلسية، فإن البلاجيوكليز الغنى بالكالسيوم يتبلور عند درجات حرارة أعلى من تلك التى يتبلور عندها البلاجيوكليز الغنى بالصوديوم.

ويعتبر صخر الجرانيت **granite** أكثر الصخور النارية المتداخلة المعروفة انتشاراً. وهو صخر فلسى فاتح اللون يحتوى على نحو 70٪ سيليكاً، كما يحتوى على كوارتز وفلسبار الأرتوكليز بوفرة، وعلى كميات أقل من فلسبار البلاجيوكليز (انظر الحد الأسفل من شكل 4.4)، وتعطى تلك المعادن الفلسية فاتحة اللون الجرانيت لونه الأحمر الوردى أو الرمادى. كما يحتوى الجرانيت على كميات محدودة من معادن المسكوفيت والبيوتيت والأمفيبول.

وصخر الريوليت **ryholite** هو المقابل البركانى للجرانيت. ويشارك هذا الصخر ذو اللون البنى الفاتح إلى رمادى، صخر الجرانيت تركيبه المعدنى الفلسى واللون الفاتح، إلا أنه دقيق التحبب جداً. ويحتوى عديد من صخور الريوليت على نسبة كبيرة من الزجاج البركانى، أو قد تتكون منه كلية.

2 - الصخور النارية المتوسطة

تقع الصخور النارية المتوسطة **intermediate igneous rocks** فى منتصف المسافة بين الحدين الفلسى والمافى. وكما يشير اسمها، فإن هذه الصخور

بمجرد تعيين نسيج الصخر. ويمثل المحور الأفقى لشكل (4.4) نسبة السيليكاً بالإضافة لتغير لون الصخر بسبب تغير محتوى الصخر من المعادن المافية والمعادن الفلسية. كما يمثل المحور الرأسى لهذا الشكل نسبة تلك المعادن فى الصخر. وعندما تقدر نسبة كل معدن فى عينة صخرية ما، فإنه يمكن تحديد الوضع الصحيح للصخر على الشكل المذكور، وبالتالى اسم الصخر المقابل من معرفة نسيج الصخر. فمثلاً عند تسمية عينة صخرية تتكون من 30٪ أوليفين و 30٪ بيروكسين و 40٪ بلاجيوكليز يتم حساب موضع النقطة على الشكل المذكور. فنرسم خطاً أفقياً عند النسبة 30٪ فيتقاطع الخط مع المنحنى الذى يفصل الأوليفين عن البيروكسين. فإذا رسمنا خط رأسياً من نقطة التقاطع فإنه يقطع المنحنى بين البيروكسين والبلاجيوكليز عند نقطة قريبة من نسبة 60٪، وهى نسبة تساوى مجموع نسبتي الأوليفين والبيروكسين، بينما تمثل النسبة الباقية (40٪) نسبة البلاجيوكليز. فإذا كان نسيج تلك العينة الصخرية خشن التحبب كان الصخر جابرو. أما إذا كان النسيج دقيق التحبب كان الصخر بازلت.

وجدير بالذكر أن الصخور على يسار الشكل السابق تكون فاتحة اللون، بينما تكون تلك التى على يمينه داكنة اللون، ويقع بينها الصخور متوسطة اللون. وقد تم رسم الخط بين الديوريت والجابرو عند الحد الذى تصل فيه نسبة المعادن الداكنة 50٪ من مجموع المعادن المكونة للصخور، وتزيد عن نسبة الفلسباريات فاتحة اللون.

1 - الصخور الفلسية

الصخور الفلسية **felsic rocks** هى صخور نارية فاتحة اللون فقيرة فى الحديد والماغنسيوم وغنية بالمعادن التى تحتوى على نسبة عالية من السيليكاً مثل

التحجب، له لون رمادي غامق . ويتميز الجابرو بوفرة المعادن المافية، خاصة البيروكسين، وهو لا يحتوي على كوارتز، وإنها على كميات متوسطة من فلسبار البلاجيوكليز الغنى بالكالسيوم.

أما البازلت **basalt** فهو صخر ذو لون رمادي داكن إلى أسود، وهو الصخر البركاني دقيق التحجب المقابل للجابرو. والبازلت أكثر الصخور النارية انتشارا في القشرة الأرضية. ويكون البازلت قيعان المحيطات تحت الطبقة الرقيقة من الصخور الرسوبية التي تغطي قيعان المحيطات. كما تنتشر على القارات فرش سمكية **sheets** من البازلت تكون هضبا عالية في بعض المناطق (مثل هضبة الدكن في الهند والغرش البازلتية في الدرع العربي بالملكة العربية السعودية والمعروفة بالخرات) (شكل 2.5)، بالإضافة إلى تواجده على هيئة جدد موازية **sills** وقواطع **dikes**.

4 - الصخور فوقالمافية

تتكون الصخور فوقالمافية **ultramafic rocks** أساسا من المعادن المافية التي تحتوي على نسبة عالية من الحديد والماغنسيوم، بالإضافة للفلسبار بنسبة أقل من 10 ٪. ونجد عند هذا المستوى المنخفض جداً من السيليكات (نحو 45٪) صخر البريدوتيت **peridotite** وهو صخر بلوتوني خشن التحجب، لونه رمادي مخضر داكن، يتكون أساساً من الأوليفين، مع كمية صغيرة من البيروكسين والأمفيبول. ونادرا ما نجد صخورا فوقمافية كصخور منبثقة، حيث إن البريدوتيت يتكون نتيجة تجمع بلورات من الصهارة لا تحتوي على أية سوائل. ولذلك لا تكون الصهارة فوقالمافية لابات.

ويتضح مما سبق أن الصخور النارية يمكن تصنيفها على أساس تركيبها المعدني والكيميائي، بالإضافة إلى

ليست غنية في السيليكات مثل الصخور الفلسية، ولا هي فقيرة فيها مثل الصخور المافية. وتوجد الصخور النارية المتوسطة على يمين صخر الجرانيت في شكل (4.4). وأول الصخور المتوسطة هو صخر الجرانوديوريت **granodiorite**، وهو صخر فلسي فاتح اللون يشبه إلى حد ما صخر الجرانيت، وهو يماثل الجرانيت في احتوائه على نسبة وفيرة من الكوارتز، وفلسبار البلاجيوكليز هو الأكثر شيوعا في الصخر عن فلسبار الأرثوكليز. ونجد على يمين صخر الجرانوديوريت صخر الديوريت **diorite**، وهو أقل في نسبة السيليكات من الصخور السابقة، ويتميز بسيادة فلسبار البلاجيوكليز مع قليل من الكوارتز أو حتى اختفائه. وتحتوي صخور الديوريت على نسبة متوسطة من المعادن المافية مثل البيوتيت والأمفيبول والبيروكسين. وبالتالي تميل صخور الديوريت لأن تكون أغرق لونا عن الجرانيت أو الجرانوديوريت.

والمقابل البركاني للجرانوديوريت هو صخر الداسيت **dacite**. ويقع إلى يمين الداسيت في السلسلة البركانية صخر الأنديزيت **andesite**، وهو المقابل البركاني لصخر الديوريت. وقد اشتق اسم صخر الأنديزيت من جبال الأنديز **Andes**، وهي سلاسل جبال بركانية في أمريكا الجنوبية.

3 - الصخور المافية

تتميز الصخور المافية **mafic rocks** بأنها تحتوي على نسبة عالية من البيروكسين والأوليفين، وهي معادن فقيرة نسبيا في السيليكات، وغنية في عنصري الحديد والماغنسيوم اللذان تعتمد منهما المعادن المافية لونها الداكن المميز. وتواجد الصخور المافية في شكل (4.4) على يمين الصخور المتوسطة، حيث نجد صخر الجابرو **gabbro**، وهو صخر متداخل خشن

mantle . وتصل الصهارة إلى سطح الأرض عن طريق البراكين . ويمكن استنتاج ثلاث خصائص مهمة للصهارة من خلال مشاهدة تدفق اللابة:

1. تتميز الصهارة بأنها تتكون في معظمها من السيليكا SiO_2 .
2. تتميز الصهارة بارتفاع درجة حرارتها .
3. تتميز الصهارة بقدرتها على الحركة وقابليتها للتدفق flow والانبثاق extrusion . وهذا صحيح بالرغم من أن بعض الصهارات تكاد تكون صلبة . وتكون معظم الصهارة عبارة عن خليط من البلورات والسوائل (ويشار إليها باسم صهر melt) .

وتدل طريقة انتقال الموجات الزلزالية في الأرض ، على أن معظم مكونات الأرض تكون صلبة حتى عمق آلاف الكيلومترات ، والتي تمتد حتى حدود لب الأرض . بينما تدل الانبثاقات البركانية على أنه لا بد من وجود مناطق تنصهر فيها الصخور لتنشأ الصهارات المختلفة . فكيف يمكن حل هذا التناقض ؟ . وتكمن الإجابة عن هذا السؤال في العمليات التي تؤدي إلى انصهار الصخور ونشأة الصهارات .

وعلى الرغم من أنه يمكننا مشاهدة الانبثاقات البركانية (اللابات) في الطبيعة ، ودراسة الفتات البركاني في المعامل ، إلا أن معظم عمليات تكوين الصخور النارية لا يمكن مشاهدتها مباشرة . وتعتمد دراسة الصهارات أساساً وعمليات تكون الصخور النارية على الاستدلال الجيولوجي والمحاكاة المعملية . فعلى سبيل المثال ، لنعرف أين تنصهر الصخور في الأرض ، فلا بد لنا أن نعرف الظروف التي ينصهر فيها

النسيج . ويمكن تفسير التاريخ الجيولوجي لهذه المجموعات المصنفة على أساس التركيب المعدني بمقارنة التركيب المعدني ودرجة حرارة التبلور . وكما يوضح شكل (4.4) أن المعادن المافية تتبلور عند درجات حرارة أعلى من تلك التي تتبلور عندها المعادن الفلسية . وبالتالي تعكس الزيادة في درجات حرارة التبلور ، درجات الحرارة التي تنصهر عندها الصخور . وعندما نتحرك من المجموعة المافية إلى الصخور الفلسية فإن محتوى السيليكا يزداد أيضاً . وتعكس زيادة محتوى السيليكا زيادة التعقيد في البنية البلورية لمعادن السيليكات . وهناك علاقة عكسية بين زيادة تعقيد البنية البلورية للمعادن السيليكاتية ، وقدرة الصخر المنصهر على الانسياب . فكلما زادت درجة تعقيد البنية البلورية ، قلت قدرة الصخر على الانسياب . وهكذا فإن اللزوجة viscosity - وهى قياس لمقاومة السوائل للانسياب - تزداد بزيادة محتوى السيليكا (شكل 4.4) . وتعتبر اللزوجة عاملاً مهماً في سلوك اللابة ، كما سترى في الفصل الخامس .

ولقد أصبح واضحاً أن معرفة المعادن المكونة للصخر تقدم معلومات مهمة عن الظروف التي تكونت فيها الصهارة الأصلية وتبلورها . ولتفسير هذه المعلومات بدقة ، فإنا يجب أن نفهم العمليات التي تؤدي إلى تكون الصهارة ، وهو ما سنناقشه فيما يلي :

II. كيف تتكوّن الصهارات؟

الصهارة magma هى مواد صخرية منصهرة تشمل على كل الحبيبات المعدنية العالقة والغازات الذائبة . وتتكون الصهارة حينما ترتفع درجات الحرارة بدرجة تكفى لصهر صخور القشرة crust أو الوشاح

العديد من الصخور والأماكن الموجودة بالأرض والتي تتواجد بها هذه الظروف .

أ. كيف تنصهر الصخور؟

لقد أضافت التجارب العملية كثيراً في فهم ميكانيكية انصهار وتصلب الصخور . فنحن نعرف من هذه التجارب أن نقطة انصهار الصخور تعتمد على التركيب المعدني والكيميائي للصخر وعلى الظروف السائدة من الحرارة والضغط .

الحرارة والانصهار: أوضحت التجارب في بداية القرن العشرين أن الصخر المتكوّن من عدد من المعادن لا ينصهر تماماً عند درجة حرارة ما . ويحدث هذا الانصهار الجزئي **partial melting** لأن المعادن المكوّنة للصخر تنصهر عند درجات حرارة مختلفة . فعندما ترتفع درجة الحرارة ، تنصهر بعض المعادن ويبقى بعضها الآخر صلباً . فإذا توقفت عملية الانصهار ، وظلت الظروف مستمرة عند درجة حرارة ما ، فإن الانصهار يتوقف ، ويتبقى خليط من الصخر الصلب والصهير . ويسمى جزء الصخر الذي انصهر عند درجة حرارة معينة بمصهور جزئي **partial melt** . ويمكن تشبيه عملية الانصهار الجزئي بتسخين قطعة من الشيكولاتة بها راقات من البسكويت ، فإذا تم التسخين إلى الدرجة التي تنصهر فيها قطعة الشيكولاتة ، فإن الجزء الأساسي من راقات البسكويت يظل صلباً .

وتعتمد نسبة الجزء المنصهر في الانصهار الجزئي على التركيب المعدني للصخور ودرجة انصهارها ودرجة الحرارة الموجودة في القشرة الأرضية أو الوشاح ، حيث تحدث عملية الانصهار . فعند الحد الأدنى من مدى عملية الانصهار ، يجب ألا تقل نسبة الجزء المنصهر عن

1٪ من حجم الصخر الأصلي . حيث يظل معظم الصخر الساخن في حالة صلبة بينما تتواجد نسبة من المصهور على هيئة قطرات صغيرة على امتداد الحدود بين البلورات في جميع أنحاء كتلة الصخر . وعلى سبيل المثال ، تتراوح نسبة الصهير في عديد من المصهورات الجزئية لصهارات بازلتية في أعلى الوشاح بين 1 و 2٪ فقط . وعند الحد الأعلى للحرارة من مدى عملية الانصهار ، فإن معظم الصخر يكون في حالة منصهرة مع كميات أقل من بلورات غير منصهرة بها . وهذا ما يحدث عندما تتواجد غرفة صهارة جرانيتية بها بلورات أسفل بركان .

وقد ساعد فهم عملية الانصهار الجزئي ، في فهم كيفية تكوّن أنواع مختلفة من الصهارة عند درجات حرارة مختلفة في أماكن مختلفة من باطن الأرض . فمن السهل الآن فهم كيف أن تركيب مصهور جزئي من صخر يحتوي على معادن ذات درجات انصهار أقل ، يكون مختلفاً بدرجة ملحوظة عن صخر تم صهره تماماً . لذلك فإن الصهارات البازلتية التي تكونت في أماكن عديدة من الوشاح قد تختلف إلى حد ما في التركيب . ومن هذه الملاحظة ، فإنه من المتوقع أن الصهارات المختلفة تأتي من نسب مختلفة من المصهور الجزئي .

الضغط والانصهار: يزداد الضغط كلما زاد العمق في الأرض نتيجة لزيادة وزن الصخور التي تعلوه . ولقد أوضحت التجارب العملية أنه عند صهر الصخور تحت ضغوط مختلفة ، فإن زيادة الضغط تؤدي إلى زيادة درجة الحرارة التي ينصهر عندها الصخر . ولذلك فإن الصخور التي تنصهر عند درجات حرارة معينة عند سطح الأرض ، تظل في الحالة الصلبة عند درجة الحرارة نفسها في باطن الأرض بسبب الضغط المرتفع . فإذا انصهر صخر عند درجة حرارة 1000°م

تتناسب درجات انصهار معادن السيليكات المختلفة مع كمية الماء المذابة في السيليكات المصهورة. ومحتوى الماء عامل مهم في انخفاض درجة حرارة انصهار مخلوط الصخور الرسوبية مع الصخور الأخرى، حيث إن الصخور الرسوبية تحتوى على حجم كبير من الماء في فراغاتها أكبر بكثير من تلك الموجودة في الصخور النارية أو المتحولة.

ب - تكوّن غرف الصهارة

تكون كثافة معظم المواد أقل في الحالة السائلة عنها في الحالة الصلبة. فكثافة المواد الصخرية المنصهرة أقل من كثافة الصخر الصلب المماثل له في التركيب - بمعنى أن وزن حجم معين من المصهور أقل من وزن نفس الحجم من الصخر الصلب. ولقد اقترح العلماء الطريقة التي تتكون بها الأجسام الكبيرة من الصهارة، فإذا أعطيت الفرصة للمصهور الأقل كثافة للتحرك فإنه سيتحرك لأعلى، كما ينتقل البترول الأقل كثافة من الماء بأن يرتفع إلى السطح في مخلوط من الماء والبترول. وحيث إن المصهور الجزئي يكون في الحالة السائلة، فإنه يتحرك ببطء لأعلى على امتداد الحدود بين بلورات الصخور التي تعلوه. وتتحرك القطرات الساخنة لأعلى، لتلتحم مع بقية القطرات، لتكوّن نجماً كبيراً من الصخر المنصهر داخل باطن الأرض الصلب.

ومن المعروف الآن أن التجمعات الكبيرة من الصخور المنصهرة تكوّن غرف الصهارة **magma chambers** - وهى تشبه كهوف كبيرة ممتلئة بالصهارة في الغلاف الصخري **lithosphere**. وتتكون من قطرات الصخر المنصهر الصاعدة وتندفع داخل الصخور الصلبة المحيطة. وقد تصل غرف

عند سطح الأرض، فإن درجة حرارة الانصهار ربما تصل إلى 1300°م عند الأعماق في باطن الأرض حيث يزداد الضغط آلاف المرات عنه عند سطح الأرض. ولذلك، فإن تأثير الضغط يفسر عدم انصهار الصخور في معظم القشرة الأرضية والوشاح إلا حيث يسمح التركيب وكل من الضغط والحرارة بالانصهار.

الماء والانصهار: أظهر تحليل اللابات الموجودة في الطبيعة وجود الماء في بعض الصهارات. لذلك قام العلماء بإضافة كميات صغيرة من الماء إلى الصخور التي قاموا بصهرها، حيث أدى ذلك إلى اكتشاف أن تركيبي المصهور الجزئي والمصهور الكامل لم يتغيرا بتغير درجات الحرارة والضغط فقط، ولكن تغير أيضاً من كمية الماء الموجودة أيضاً. ولتأخذ مثلاً تأثير محتوى الماء على معدن الألبيت وهو أحد معادن فلسبار البلاجيوكليز الغنى بالصدويوم، وذلك عند الضغط المنخفض عند سطح الأرض. فإذا كان الماء موجوداً بكمية بسيطة، فإن الألبيت النقي يظل في الحالة الصلبة حتى درجات حرارة فوق 1000°م حيث يتواجد الماء في الألبيت عند هذه الدرجات العالية من الحرارة في صورة غاز. فإذا أضفنا الماء بكميات كبيرة، فإن درجة حرارة انصهار الألبيت تنخفض إلى 800°م. ويتبع هذا السلوك القاعدة العامة التي تقول بأن إضافة مادة إلى مادة أخرى يؤدي إلى انخفاض درجة انصهار المحلول. وتلك القاعدة يمكن ملاحظتها في المناطق الباردة حيث يتم رش الملح على الثلج المتجمع على الطرقات حتى تنخفض درجة انصهار الثلج.

وبالطريقة نفسها، فإن درجة حرارة انصهار الألبيت وكل معادن السيليكات الأخرى تنخفض بشكل ملحوظ في وجود كميات كبيرة من الماء، حيث

magmatic differentiation . ومفهوم هذه النظرية أن صخورا مختلفة في التركيب تتكون من صهارة واحدة متجانسة تعرف بالصهارة الأم **parent magma** . بالتأيز الصهاري، كما يحدث أحيانا انشقاق للصهير الأم إلى صهارات مختلفة تعرف بالصهارة المشتقة **derivative magma** . ويتكون من كل صهارة مشتقة نوع من الصخور النارية يختلف في تركيبه عن الصهارة الأم . ويحدث التأيز الصهاري بسبب اختلاف درجة حرارة تبلور المعادن وكثافتها . ويتغير تركيب الصهارة أثناء عملية التبلور نتيجة نقص بعض العناصر الكيميائية التي استخدمت في تكوين المعادن المتبلورة .

وبصورة ماثلة لعملية الانصهار الجزئي ، فإن أول المعادن المتبلورة من الصخور المنصهرة أثناء التبريد تكون هي آخرها في الانصهار أثناء التسخين في التجارب المعملية . وخلال هذه العملية من التبلور ، فإن التركيب الكيميائي للصهارة يتغير نتيجة دخول العناصر الكيميائية المختلفة في تبلور المعادن ، وأخيرا ، وعند درجة الحرارة التي يتم عندها تصلب الصهارة تماما ، فإن آخر المعادن المتبلورة هي أولها في الانصهار عندما يتم تسخين الصخر . ولقد ظهر أثناء التجارب المعملية أن هناك نمطين للتبلور:

1. تغير مستمر وتدرجي . وفي هذا النموذج ، والذي يمثل فلسبار البلاجيوكليس ، يتغير التركيب الكيميائي للفلسبار المتكون تدريجيا أثناء تقدم عملية التبلور .
2. تغير فجائي ومتفصل . وفي هذا النموذج ، والذي يميز المعادن المافية مثل الأوليفين والبيروكسين ، تتغير البنية البلورية والتركيب الكيميائي للبلورات دون تواصل أثناء التبريد ، حيث يتغير معدن ما فجأة إلى معدن آخر عند درجة حرارة معينة . ونظرا

الصهارة لأحجام كبيرة قد تصل إلى عدة كيلومترات في الحجم . وما تزال الطريقة التي تتكون بها غرف الصهارة ، وكذلك التحديد الدقيق لشكل غرف الصهارات في الأبعاد الثلاثة موضع دراسة .

ويمكن تصور غرف الصهارة على أنها كهوف كبيرة ممتلئة بالصهير في وسط من الصخور الصلبة ، حيث تتمدد نتيجة لإضافة المزيد من مصهور الصخور المحيطة أو السوائل التي تهاجر خلال الكسور والفتحات الصغيرة الأخرى بين البلورات . وتتكشف غرف الصهارة بعد اندفاع الصهارات إلى السطح عند الانبثاقات . ومن المسلم به الآن وجود غرف الصهارة ، حيث تظهر الموجات الزلزالية عمقها وحجمها والحدود العامة لها أسفل البراكين النشطة .

III. التأيز الصهاري

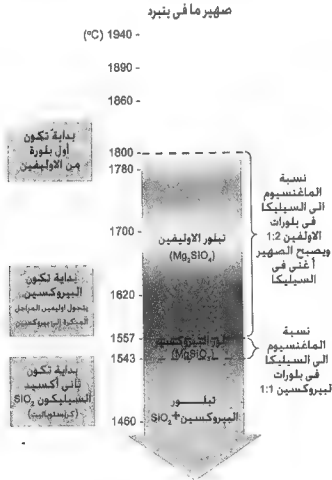
لقد أوضحنا فيما سبق كيف تتكون الصهارات ، إلا أننا لم نعرف كيف تتكون الأنواع المختلفة من الصخور النارية . فهل تتكون هذه الصخور من صهارات مختلفة في التركيب الكيميائي نتيجة انصهار أنواع مختلفة من الصخور؟ أم أن هناك عمليات أخرى تؤدي إلى تكون الأنواع المختلفة من الصخور من مادة واحدة أصلية متجانسة؟ . وقد تم الإجابة على هذه الأسئلة من النتائج التي تم التوصل إليها من الدراسات التي تمت على الصخور النارية في أوائل القرن العشرين . حيث خلط العلماء عناصر كيميائية بنسب تحاكي تلك الموجودة في الصخور النارية في الطبيعة ، ثم قاموا بصهرها في أفران ذات درجة حرارة عالية . وقد سجلت درجات الحرارة التي تتصلب عندها الصهارات وتتكون البلورات ، وكذلك التركيب الكيميائي لهذه البلورات . ولقد أدت هذه الدراسات إلى التوصل إلى نظرية التأيز الصهاري

المصهور، ويستنفد تكوين هذه البلورات الكالسيوم من المصهور جزئياً. ويصبح المصهور المتبقى أغنى في الصوديوم. ونتيجة ذلك، ومع استمرار تبريد المصهور، فإن البلورات التالية في التكوين تزداد غنى في الصوديوم. وتتفاعل البلورات الغنية بالكالسيوم والمتكونة أولاً مع المصهور الغنى في الصوديوم. وفي هذا التفاعل، فإن أيونات الصوديوم في المصهور تحل محل أيونات الكالسيوم في البلورة، بحيث تصبح

لأن هذين النموذجين للتبلور أساسيان لفهم عملية التمايز الصهاري، فإننا سنتناولها هنا بمزيد من التفصيل:

أ - سلسلة التفاعل المتصلة

عندما تبرد مصهورات محتوية على فليسيار بلاجيوكليز ذات تركيب كيميائي متنوع، فإن أول البلورات المتكونة تكون دائماً أغنى في الكالسيوم عن



شكل (5.4): جزء من سلسلة التفاعل غير المتصلة discontinuous reaction series. يحدث التتابع الموضح في الشكل عندما يبرد صهبر مكون من الماغنسيوم والسيليكا، وتكون السيليكا نحو 50 / من وزنه. وهذا يمثل جزءاً من سلسلة التفاعل غير المتصلة التي يتبلور بواسطتها تتابع من المعادن المختلفة من صهبر في سلسلة تتغير فجأة. ولا يتبلور الأوليفين في المراحل الأولى في كل صهبر عند 1800°م بالضبط، حيث تعتمد درجة الحرارة على تركيب الصهبر للتبرد.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

حرارة المصهور إلى 1557°م. وتحت هذه الدرجة يتكون البيروكسين فجأة، وهو معدن مختلف تماماً عن الأوليفين، وتتحول كل بلورات معدن الأوليفين المتكونة مبكراً إلى البيروكسين (شكل 5.4). وعند 1543°م، يبدأ معدن الكريستوباليت في التكون، وهو أحد معادن السيليكات المتكونة عند درجة الحرارة العالية، كما يستمر البيروكسين في التبلور حتى يتم التصلب تماماً.

وفي بعض التجارب الأخرى، وباستخدام مصهورات ذات تركيب كيميائي مختلف يتبلور الأامفيبول أولاً، ثم البيوتيت عند درجات حرارة أقل من سلسلة الأوليفين - بيروكسين. وفي سلسلة التفاعل غير المتصلة **discontinuous reaction series** هذه يحدث تفاعل بين المصهور ومعدن لها تركيب محدد عند درجات حرارة معينة فقط لتكوّن معادن جديدة مختلفة. وتختلف هذه العملية عن التطور التدريجي لفلسبار البلاجيوكليز والمصهور الأصلي حيث يحدث التفاعل على مدى مستمر ومتدرج من التركيب ودرجات الحرارة.

والبنية البلورية لمعادن السلسلتين التفاعليتين هي جزء من الاختلافات في البنية البلورية لمعادن السيليكات (شكل 14.2). ويلاحظ أن البنية البلورية الأساسية لفلسبار في سلسلة التفاعل المتصلة تبقى ثابتة بالرغم من تغير نسبة كل من الكالسسيوم والصوديوم. وتبلور معادن البلاجيوكليز في فصيلة الميول الثلاثة وتتميز بتركيب إيطاري يتكون من رباعيات الأوجه السيليكاتية الممتدة في الأبعاد الثلاثة (وفي الحقيقة فإن البنات البلورية لمعادن البلاجيوكليز تكون معقدة وتغير تبعاً للتركيب الكيميائي وظروف التبلور، ولكن لن نتناول تلك التفصيلات في

البلورات الغنية بالكالسسيوم والمتكونة في المرحلة المبكرة أغنى في الصوديوم. وتكون جميع البلورات، سواء المتكونة سابقاً أو لاحقاً جميعاً التركيب الكيميائي نفسه. ومع استمرار العملية، يصبح كل من المصهور والبلورات أغنى تدريجياً في الصوديوم وأفقّر في الكالسسيوم. وعند اكتمال عملية التبلور، تصبح الكتلة النهائية الصلبة المتجانسة للبلورات لها تركيب المصهور الأصلي نفسه. ونلاحظ أنه في كل المراحل، فإن المعدن المتبلور كان دائماً هو فلسبار البلاجيوكليز.

والفكرة الأساسية لهذه العملية هو التفاعل المستمر للبلورات مع المصهور، حيث يحدث تغير بسيط باستمرار، بحيث إنه عند أي نقطة خلال التبلور، فإن كل البلورات يكون لها التركيب الكيميائي نفسه. وتتحرك البلورات والمصهور خلال سلسلة من التراكيب، تكون أغنى في الكالسسيوم في المرحلة المبكرة، وأغنى في الصوديوم في المراحل اللاحقة. ومع استمرار عملية التبريد، تستمر سلسلة التفاعل المتصلة **continuous reaction series** في التقدم حتى تتم عملية التبلور.

ب - سلسلة التفاعل غير المتصلة

يتضمن تبلور المعادن المافية مثل الأوليفين والبيروكسين والأامفيبول وميكا البيوتيت عملية مختلفة إلى حد ما عن تبلور معادن البلاجيوكليز. فقد أظهرت التجارب أنه إذا بردت مصهورات تحتوى على مكونات المعادن المافية بشكل تدريجي، وبطريقة ماثلة للتجارب التي أجريت على فلسبار البلاجيوكليز، بحيث يمكن للبلورات أن تتفاعل مع المحلول، فإن المعادن المتكونة تبدى أيضاً طريقة منتظمة في التبلور. فعند 1800°م يتبلور الأوليفين، ويستمر في التبلور حتى تصل درجة

نهاية عملية التبلور صخر واحد مكوّن من فلسبار بلاجيوكليز واحد فقط تركيبه الكيميائي يقابل تركيب الصهارة الأم الأصلية بالإضافة إلى معدن البيروكسين. ولن نجد أى أثر لمراحل التبلور الأولى والتي تشمل فلسبار بلاجيوكليز غنى بالكالسيوم والأوليفين. وعند فحص صخور بركانية أخرى يحتوى بعضها على بلاجيوكليز غنى بالكالسيوم والأوليفين، فقد يشير ذلك إلى غياب بعض مراحل عملية التبلور طبقاً لنظرية التمايز الصهاري.

ج. التبلور التجزيئي

احتاجت نظرية التمايز الصهاري إلى جزء أساسي آخر ليفسر أسباب الاحتفاظ ببعض المعادن المتكونة مبكراً بينما تغير تركيب الصهير. فقد اقترح الجيولوجي الكندي بوين N.L. Bowen في أوائل القرن الماضي ميكانيكية تفسر ذلك. حيث قام بوين عام 1928م بدراسة سلسلة التفاعل المتصلة وغير المتصلة، لأنه كان مهتماً بدراسة عملية التبلور وخاصة في المواقع التي لم يتغير فيها تركيب فلسبارات البلاجيوكليز، أو المعادن المافية خلال التفاعل مع السوائل المتبقية. فإذا بردت صهارة بطريقة أسرع من المعتاد، فإن بلورات فلسبار البلاجيوكليز في مثل هذه الصهارة قد تجد الوقت الكافي للنمو، ولكن لن تجد البلورات الوقت الكافي للتفاعل مع الصهير إلا من خلال الأسطح الخارجية فقط. ونتيجة لذلك، فإن الطبقة الخارجية لكل بلورة سوف يتغير تركيبها. ومع تقدم عملية التبلور فإن الأجزاء الداخلية لبلورات الفلسبار تكون غنية بالكالسيوم ويحيط بها طبقات متعاقبة من البلاجيوكليز الذي أصبح أغنى في الصوديوم، حيث يكون الوقت غير كافٍ لتحرك أيونات الكالسيوم Ca^{2+} والأكسجين Al^{3+} إلى الخارج من بلورات البلاجيوكليز المتكونة، لتحل محلها أيونات الصوديوم Na^{+} والسيليكون Si^{4+} الموجودة في الصهير.

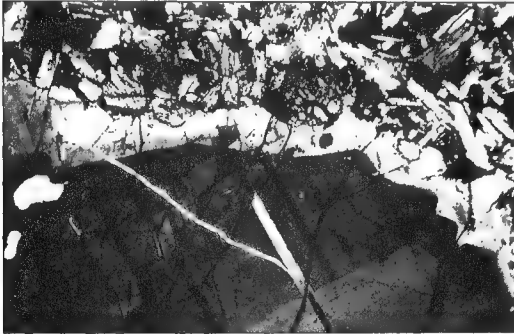
هذا الجزء من الكتاب). وعلى العكس من ذلك، تتغير البنيات البلورية لسلسلة التفاعل غير المتصلة بانخفاض درجة الحرارة، مكونة تراكيب من رباعيات الأوجه السيليكاتية تزداد تعقيداً مع انخفاض درجة الحرارة. فعند أعلى درجات الحرارة، تتكون البنية البلورية لمعادن الأوليفين من رباعيات الأوجه السيليكاتية المفردة، وهي الوحدة البنائية الأساسية لمعادن السيليكات (انظر الفصل الثاني). وفي المرحلة التالية تتكون البيروكسينات من سلاسل مفردة من رباعيات الأوجه ثم تأتي الأمفيولات المكونة من سلاسل مزدوجة من رباعيات الأوجه المتصلة، يليها الميكا المكوّنة من صفائح من رباعيات الأوجه. وعند المرحلة النهائية لكل من السلسلتين التفاعليتين المتصلة وغير المتصلة نجد الكوارتز والفلسبارات، وهي عبارة عن ترابط إيطاري (هيكل) في الأبعاد الثلاثة من رباعيات الأوجه السيليكاتية.

وفي أثناء تبريد الصهارة في الطبيعة، والتي تحتوى عادة على العناصر الكيميائية لكل من فلسبارات البلاجيوكليز والمعادن المافية، فإن التبلور يحدث في نفس الوقت لكل من السلسلتين التفاعليتين. فعندما تنخفض درجة حرارة الصهارة عن $1550^{\circ}C$ يتكون البيروكسين خلال سلسلة التفاعل غير المتصلة وتبلور فلسبار البلاجيوكليز المكوّن من الكالسيوم النقي خلال سلسلة التفاعل المتصلة.

وعلى الرغم من أن هاتين السلسلتين التفاعليتين تفسرا تركيب معظم الصخور النارية، إلا أنها لا تستطيع تفسير تركيب بعض الصخور الأخرى. فإذا أخذنا في الاعتبار صهارة طبيعية تفاعلت كل البلورات فيها مع مصهور الصخر عند كل مراحل التبلور، فإننا نتوقع تحت هذه الظروف أن يتكون في

وقد اقترح برون نظرية لتفسير عملية التمايز الصهاري اعتاداً على التجارب المعملية والملاحظات الحقلية . حيث يمكن خلال تلك العملية أن تتجمع البلورات المتكونة في المرحلة المبكرة ثم تنعزل عن المصهور المتبقى بعدة طرق: منها أن يعمل الاستقرار البلوري على تجمع البلورات المتكونة مبكراً في قاع غرفة الصهارة ، ثم تنفصل تلك البلورات عن أى تفاعلات أخرى مع السائل المتبقى. كما قد يؤدي كبس السائل المتبقى في غرفة الصهارة نتيجة لتشوهات تكتونية لغرفة الصهارة أثناء عملية التبلور إلى عزل وضغط البلورات كجسم ناري متداخل واضح المعالم ، وبذلك فإن الصهارة تهاجر إلى أماكن جديدة لتكون

وستكون النتيجة النهائية لذلك أن يتكون ما نطلق عليه بلورة متمنطقة **zoned crystal** ، وهي بلورة مفردة من معدن واحد لها تركيب كيميائي مختلف في أجزائها الداخلية عنه في أجزائها الخارجية (شكل 6.4). وبالإضافة إلى تأثير التبلور السريع ، فلا بد أن هناك عاملاً آخر يؤدي إلى عدم تغير التركيب. فإذا غلفت الأجزاء الداخلية الغنية بالكالسيوم من البلورة النامية ، فإن السائل لن يصل إلى حالة اتزان مع البلورات ، كما يحدث في أثناء التفاعل المستمر البطيء . ولذلك يبقى السائل غنياً بالصوديوم ، لأن الكالسيوم الموجود في الأجزاء الداخلية للبلورة لم يعد متاحاً ليحل محل الصوديوم في المصهور.



شكل (6.4) : بلورة متمنطقة **zoned crystal** لمعدن ابلاجيوكليز من جبل القطراني - الصحراء الغربية - مصر . ولاحظ أن الأجزاء الداخلية لبلورة ابلاجيوكليز تكون غنية بالكالسيوم ، وتحيط بها طبقات متعاقبة من ابلاجيوكليز تزداد بها نسبة الصوديوم كلما اتجهنا ناحية النطاقات الخارجية . (أ.د. يوسف الششناوى ، قسم الجيولوجيا ، جامعة الأزهر) .

البلورات المنزلة والغنية في الكالسيوم والتي تكونت في المرحلة الأولى، ستكون كتلة من الفسبار أغنى في الكالسيوم عن المصهور الأصل. والتبلور التجزيئي **fractional crystallization** هو المصطلح المستخدم لشرح هذا الانفصال وإزالة الأجزاء المتكونة من البلورات على التوالي عند تبريد الصهارة (شكل 7.4). وقد اعتقد بون أن هذه العملية تؤدي إلى الاحتفاظ بالفلسبارات الغنية بالكالسيوم في المراحل المبكرة، وتبلور بلاجيوكليز غنى بالصوديوم من صهارة غنية أصلاً في الكالسيوم.

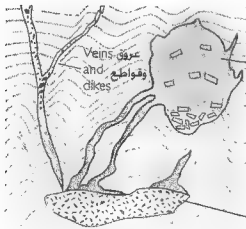
غرفاً جديدة (شكل 7.4). وسواء حدث ذلك باستقرار البلورات أو بالتشوه التكتوني، فإن البلورات المتكونة في المراحل المختلفة مستعزلة عن المصهور المتبقى، والذي سوف يسلك كما لو كان قد بدأ في التبلور في اللحظة نفسها. ففي سلسلة التفاعل المتصلة، يبدأ الصهير الذي أصبح أغنى في عنصر الصوديوم، في تكوين بلورات فلسبار أغنى في الصوديوم من ذلك الفلسبار الذي تبلور من الصهارة التي لم يحدث فيها عزل للبلورات. ويؤدي استمرار التبلور إلى تكون كتلة من فلسبارات أغنى بكثير في الصوديوم عن الصخر المتكون من الصهير الأصلي. وفي الوقت نفسه، فإن



تتكون البلورات من صهارة متبردة وتهبط إلى قاع غرفة الصهارة

تتراكم البلورات المتكونة في مراحل التبريد المبكرة

أ- مرحلة التبلور المبكر



تهاجر الصهارة إلى غرفة صهارة ثانية حيث تستمر عملية التبلور

تتراكم كتلة البلورات التي تكونت في مرحلة مبكرة وتضغط لتكون جسماً منفصلاً من الصخور المتداخلة

ب- يؤدي التشوه في مرحلة لاحقة إلى عصر السائل المتبقى من كتلة البلورات المتجمعة

شكل (7.4): تتبايز الصهارة بالتبلور التجزيئي **fractional crystallization** على مرحلتين:

- (أ) تهبط البلورات المتكونة في المرحلة المبكرة إلى قاع غرفة الصهارة، وباستمرار عملية التبريد قد يؤدي التشوه التكتوني إلى عصر السائل المتبقى في غرفة الصهارة، بينما تتراكم وتكسب (تندفع) البلورات لتكوّن جسماً نارياً متداخلاً مستقلاً.
- (ب) يهاجر السائل المنفصل إلى أماكن جديدة، ليكون عروفاً وقواطعاً وغرف صهارة أخرى، حيث يستمر في التبلور.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

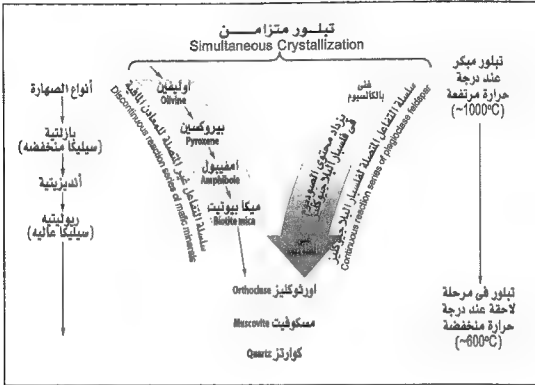
- الانتشار الواسع للجرانيت ، وهو صخر متداخل يقع عند نهاية الحد الأعلى لمحتوى السيليكا في الصخور النارية ، كما أنه يحتوى على البلاجيوكليز الغنى بالصوديوم ومعادن أخرى تتميز بانخفاض درجات حرارة انصهارها.
 - البازلت ، والسذى بمائيل الجرانيت في سعة الانتشار. والبازلت صخر منبثق يقع عند نهاية الحد الأدنى للسيليكا في الصخور المافية ، كما أنه يحتوى على بلاجيوكليز غنى بالكالسيوم ومعادن أخرى تتميز بارتفاع درجة حرارة انصهارها .
- هـ - النظريات الحديثة بعد نظرية بوين
- نجمت نظرية بوين للتمايز الصهاري في بادئ الأمر في شرح كيف تتكون أنواع مختلفة من الصخور النارية بالتبلور التجزيى . كما شرحت نظرية بوين طريقة تكون الريوليت (وهو صخر منبثق مقابل للجرانيت) في نهاية سلسلة من الانبثاقات ، والتي بدأت باللابة البازلتية .

د - نظرية بوين للتمايز الصهاري

اعتقد بوين أن التبريد التدريجي وتمايز الصهارة البازلتية قد يؤدي إلى تكوين صهير يحتوى على نسبة أكبر من السيليكا ، وأقل في درجة الحرارة بسبب التبلور التجزيى . وعندما تتمايز الصهارة البازلتية بالتبلور التجزيى في المراحل المبكرة تتكون صهارة أنديزيتية ، وتنبثق لتكوّن لابة أنديزيتية أو تتبلور ببطء لتكوّن متداخل من صخر الديوريت . وتؤدي المراحل المتوسطة من هذه العملية إلى تكوّن صهارات لها تركيب الجرانوديوريت. فإذا استمرت هذه العملية لوقت أطول ، تكونت لابات ريوليتية ومتداخلات من صخر الجرانيت في المراحل المتأخرة (شكل 8.4) .

ويوضح التبلور التجزيى والتمايز الصهاري لماذا يحدث تنوع في تركيب الصخور النارية ، كما يجب أن يفسر حقيقتين تبدوان متعارضتين وهما:

وكما يحدث دائما عندما تستحوذ نظرية علمية جديدة على اهتمام الأوساط العلمية بسرعة ، إلا أن الأبحاث التالية أثبتت الحاجة الماسة لإدخال تعديلات عليها ؛ حيث أثبتت الأبحاث العلمية أنه لكى تتكون بلورات صغيرة من الأوليفين من صهارة لزجة وكثيفة، فإن ذلك يحتاج إلى وقت طويل جدا ، وقد لا تصل أبدا إلى قاع غرفة الصهارة . كما أوضحت أبحاث أخرى أن هناك عدداً من المتداخلات المتطابقة التي تظهر العديد من الطبقات ذات تراكيب معنينة مختلفة ، ولا يمكن تفسيرها ببساطة من خلال نظرية بوين . ولكن المشكلة الكبرى مع ذلك ، كانت وجود مصدر للأحجام الضخمة من الجرانيت الموجود على سطح الأرض ،



شكل (8.4): سلسلة بوين التفاعلية Bowen's reaction series اقترح بوين معطفاً مبسطاً لشرح كيف يؤدي التبلور التجزيئي fractional crystallization لصهر إلى تكوّن عدة صهارات متبايزة . حيث يوجد مساران مختلفان ومتزمانان يسمحان بتبلور عدة معادن عند تبريد صهارة بازلتية مرتفعة في درجة حرارتها . وعلى الرغم من أن تلك السلسلة تشرح نظرياً ماذا يحدث للصهارة ، إلا أنها لا تقدم الكثير في تفسير أصل بعض الصخور النارية ، مثل التداخل الواسع للجرانيت . وعلى الرغم من ذلك فإنه تبقى تلك السلسلة أهميتها في فهم دور التبلور التجزيئي في تكوين المعادن .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York)

الصهاري . وقد كشفت الدراسات اللاحقة أن انصهار كميات ضخمة من الأنواع المختلفة للصخور في الوشاح الأعلى upper mantle والقشرة crust يؤدي إلى تغير واسع في تركيب الصهارات . فقد تنصهر جزئياً الصخور في أعلى الوشاح لتكوّن صهارة بازلتية ، بينما ينصهر خليط من الصخور الرسوبية والصخور البازلتية المحيطية في نطاق الاندساس لتكوّن صهارة أنديزيتية . وقد يؤدي انصهار خليط من الصخور الرسوبية النارية والمتحولة في القشرة القارية إلى تكون صهارة ريوليتية (جرانيتية) .

والتي لا يمكن تكوينها بالطريقة التي تقترحها نظرية بوين ، نظراً لفقد كميات كبيرة من السوائل بالتبلور من خلال المراحل المتعاقبة من التمايز . ولكي يتكون الحجم الحالي من الصخور الجرانيتية ، فإننا نحتاج إلى حجم من الصهارة البازلتية يساوي عشرة أضعاف حجم متداخلات الجرانيت . مما يتطلب تبلور كميات ضخمة من البازلت تحت المتدخلات الجرانيتية ، إلا أن الدراسات الحديثة لم تثبت وجود هذه الأحجام الضخمة من البازلت . وحتى مع وجود كميات كبيرة من البازلت - عند حيود وسط المحيط - فلم يحدث مثل هذا التحول الشامل إلى الجرانيت من خلال التمايز

التمثل الصهاري: قد يسبب تداخل الصهارة انصهار بعض الصخور المحيطة بها ، أو ابتلاع بعض الصخور الصلبة وضمها في الصهارة (شكل 9.4). ويطلق على هذه العملية مصطلح التمثل الصهاري **magmatic assimilation** . فإذا صُهرت أجزاء من قشرة قارية بصهارة بازلتية ساخنة ، فإن محتوى الصهارة من السيليكا يزداد وتبرد الصهارة أيضا. ومن المحتمل أن الصهارات الأنديزيتية المصاحبة لبراكين حزام المحيط الهادئ قد نشأت من تمثل صهارة بازلتية لبعض صخور القشرة .

وعلى الرغم من أن نظرية بوين الأصلية للتمايز الصهاري قد تغيرت منذ اقترحها بوين منذ عدة عقود ، إلا أن الكثير من الأبحاث اللاحقة والتي أجريت على تمايز الصخور النارية، كان مبنيا أساسا على أفكار بوين .

و- التمثل واختلاط الصهارات

تدل الدراسات الحديثة أن عملية التمايز الصهاري لبوين لا تكفى وحدها لتفسير نشأة كل أنواع الصخور النارية المعروفة ، وأن هناك ميكانيكيات أخرى قد تؤدي أيضا إلى نشأة صهارات ذات تراكيب كيميائية مختلفة .

شكل (9.4): التمثل Assimilation: هو تكون صهارة ذات تركيب متوسط بين تركيب الصهارة الأصلية وتركيب صخور المنطقة التي بلعت وضممت .

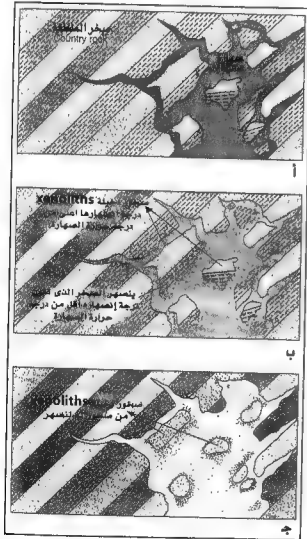
(أ) تعمل الصهارة الصاعدة على كسر صخور المنطقة ،

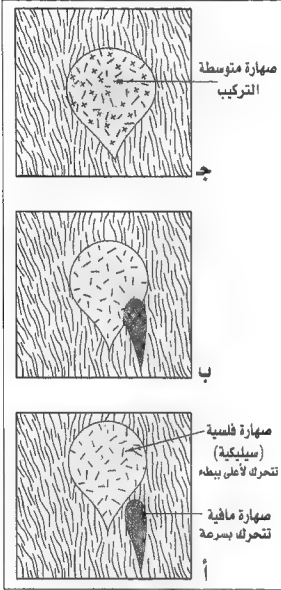
وتسمى تلك العملية بالالتهام الصهاري **magmatic stopping**

(ب) تنصهر صخور دخيلة xenoliths من صخور المنطقة التي تكون درجة حرارة انصهارها أقل من درجة حرارة الصهارة .

(ج) تختلط صخور المنطقة التي تكون منصهرة مع الصهارة الأصلية ، وتترك بعض الأجزاء من الصخور الدخيلة التي لم تنصهر .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlos, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).





شكل (10.4): اختلاط الصهارات magma mixing

(أ) صهارتان تتحركان نحو سطح الأرض
(ب) تختلط الصهارة المافية بالصهارة الفلزية والتي تكون أغنى في
محتوى السيليكا

(ج) تختلط الصهارتان وتكونان ذات تركيب متوسط . وتشبه تلك

العملية تكون "كوكيتل" من صهارات مختلفة التركيب .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

بمعدل استثنائي في المناطق النشطة تكتونيا أو بركانيا
تصل إلى 1500 °م عند أعماق نحو 40 كم ، أى ليست
بعيدة عن الحد السفلى للقشرة . وتكون هذه الحرارة

اختلاط الصهارات: هناك ميكانيكية أخرى يمكن
أن تؤدي إلى تغيير تركيب الصهارة ، والتي تعرف
باختلاط الصهارات magma mixing . وقد تحدث
هذه العملية عندما تتقابل صهارتان قابلتان للامتزاج
ويختلطان في القشرة ليكونا صهارة ذات تركيب
متوسط (شكل 10.4) . فإذا اختلطت كميتان
متساويتان من صهارة بازلتية وصهارة ريوليتية
(جرانيتية) ، فإن الصهارة الناشئة تتبلور تحت سطح
الأرض لتكوّن صخر الديوريت ، وتبلور فوق سطح
الأرض لتكوّن صخر الأنديزيت .

ومن معرفتنا بكيفية تكون الصهارة ، فإنه يمكن
فهم مواضع تكون الأنواع المختلفة منها عند درجات
الحرارة المختلفة وأماكنها في باطن الأرض .

17. مواضع تكوّن الصهارات وأنواعها

يقوم فهمنا لعمليات تكوين الصخور النارية على
الاستدلال الجيولوجي والتجارب العملية . ويعتمد
الاستدلال الجيولوجي أساساً على النتائج المستمدة من
مصدرين أساسيين . أولهما البراكين الموجودة سواء فوق
سطح الأرض أو تحت الماء ، حيث تنبثق الصخور
المصهورة . كما تعتبر الحرارة المسجلة في الآبار العميقة
ومهوى المناجم mine shafts (فتحة رأسية يتم من
خلالها تشغيل المناجم تحت السطحية) المصدر الثاني
للتنتائج ، والتي تبين أن الحرارة الداخلية للأرض تزداد
مع العمق . ولقد تمكن العلماء باستخدام هذه النتائج
من تقدير المعدل الذي ترتفع به الحرارة مع زيادة العمق
(تدرج حراري temperature gradient) .

وتكون درجات الحرارة المسجلة في بعض المناطق
أكبر بكثير من الدرجات المسجلة عند العمق نفسه في
مناطق أخرى ، مما يدل على أن درجة حرارة بعض
أجزاء القشرة الأرضية والوشاح تكون أعلى منها في
المناطق الأخرى . فعلى سبيل المثال ، تزداد الحرارة

2 - أصل الصهارة الأنديزيتية

يقارب التركيب الكيميائي للصهارة الأنديزيتية المتوسط العام لتركيب القشرة القارية. وتواجد الصخور النارية المتكونة من الصهارة الأنديزيتية في القشرة القارية. وتشير تلك الحقائق إلى إمكانية نشأة الصهارة الأنديزيتية من الانصهار الكامل لجزء من القشرة القارية.

وعلى الرغم من أن بعض الصهارات الأنديزيتية تتكون فعلاً بهذه الطريقة، إلا أنه لوحظ انبثاق صهارة أنديزيتية من براكين فوق القشرة المحيطية بعيدة عن القشرة القارية، مما يحتم ضرورة افتراض أن الصهارة في تلك الحالات يجب أن تتكون إما من الوشاح وإما من القشرة المحيطية.

وقد أوضحت التجارب العملية أن الانصهار الجزئي لقشرة محيطية بازلتية تحتوي على الماء، يؤدي إلى تكوين صهارة أنديزيتية تحت ظروف مناسبة من الضغط والحرارة. وعندما يندس لوح من الغلاف الصخري في الغلاف اللدن (الأستينوسفير) فإنه يحمل معه القشرة المحيطية البازلتية والصخور الرسوبية التي تعلوه، والتي تكون مشبعة بالماء، حيث ترتفع درجة حرارة اللوح. كما يؤدي الماء المنطلق من اللوح الهابط إلى تنشيط الانصهار الجزئي للوشاح أعلى اللوح الهابط. وفي النهاية تبدأ القشرة المحتوية على الماء في الانصهار، حيث يؤدي الانصهار الجزئي للصخور المحتوية على الماء، عند ضغط مساوٍ إلى عمق 80 كم، إلى تكون مصهور له تركيب الصهارة الأنديزيتية. ويدعم فكرة أن معظم الصهارة الأنديزيتية تنشأ بهذه الطريقة وجود حزام من البراكين الأنديزيتية النشطة يحيط بالمحيط الهادئ (حول اللوح الهادئ). ويوضح شكل (11.4) خط الأنديزيت Andesite Line، وهو خط يوازي حواف حوض المحيط الهادئ، ويفصل المناطق داخل

عالية بدرجة كافية لصهر البازلت. أما في المناطق المستقرة كتونيا، وعند نفس العمق فترتفع الحرارة ببطء أكثر، لتصل فقط إلى 500°م.

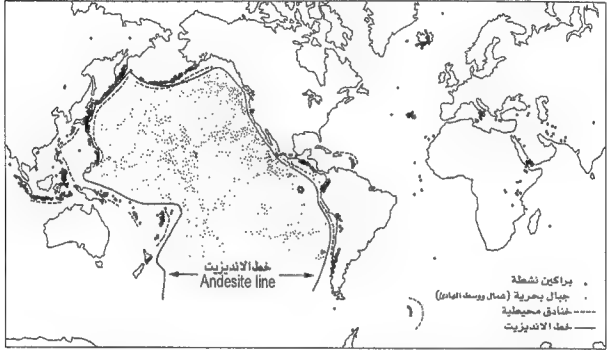
ومن المعروف الآن أن أنواعاً عديدة من الصخور يمكن أن تتصلب من الصهارة خلال عملية الانصهار الجزئي. وأن ازدياد درجة الحرارة في باطن الأرض يمكن أن يسبب تكون الصهارات. ويسمى الجيولوجيون الصهارات بأسماء مجموعات الصخور النارية المقابلة لها. وتستخدم عادة أسماء الصخور البركانية، مثل: صهارة ريوليتية (مجموعة الصخور الفلسية) وصهارة أنديزيتية (مجموعة الصخور المتوسطة) وصهارة بازلتية (مجموعة الصخور المافية). وسوف نستخدم تلك المصطلحات هنا. وسناقش الأنواع الرئيسية للصهارات البازلتية والأنديزيتية والريوليتية فيما يلي:

1. أصل الصهارة البازلتية

تشمل المعادن السائدة في صخور البازلت كلا من البروكسين والبلاجيوكليس، بالإضافة إلى بعض الأوليفين. وتتميز تلك المعادن كلها بأنها معادن لأمائية. وترجع تلك الحقيقة إلى احتمال أن الصهارة البازلتية هي صهارة جافة أو فقيرة في محتوى الماء. وتدل جميع المشاهدات والدلائل أثناء انبثاق اللابة البازلتية أن محتوى الصهارة البازلتية من الماء ينذر أن يتعدى 0.2%. لذلك، فإنه يمكن استنتاج أن الصهارة البازلتية تنشأ نتيجة عملية الانصهار الجزئي الجاف للصخور فوقالمافية (مثل البريدوتيت) المتكونة في الأجزاء العليا من الوشاح وعند أعماق تصل إلى نحو 100 كم. وتصدع الصهارة البازلتية لأعلى بعد نشأتها بغض النظر عن القشرة التي تعلوها (قارية أو محيطية).

(الجراثيميه) تحتوى على كميات ملحوظة من المعادن التى يحتوى تركيبها الكيميائى على الماء مثل معادن الميكا والأمفيبول، الذى يأتى من الماء المذاب فى الصهارة.

المحيط التى تتواجد بها صهارة بازلتية فقط عن المناطق خارج خط الأنديزيت ، والتى يكون تواجد الالابة الأنديزيتية بها شائعاً . ولكن قد تتواجد بها أيضا صهارة بازلتية .



شكل (11.4): خط الأنديزيت andesite line الذى يوازى حواف حوض المحيط الهادئ، ويفصل مناطق داخل المحيط تتواجد بها فقط الصهارة البازلتية من المناطق خارج الخط ، والتى يشيع بها تواجد الالابة الأنديزيتية ، بينما قد تتواجد بها أيضا صهارة بازلتية .
(After Holmes, 1978; G. A. Macdonald, Volcanoes, © 1972. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ).

وتؤدى هاتان النقطتان إلى إمكانية نشأة صهارة

ريوليتية من الانصهار الجزئى لصخور تحتوى على الماء ولها تركيب الأنديزيت ، حيث يشبه تركيب الأنديزيت المتوسط العام لتركيب القشرة القارية . وتؤيد التجارب العملية أيضا هذا الاقتراح ؛ فقد أوضحت تلك التجارب أنه عندما انصهرت صخور تحتوى على الماء ، ولها تركيب يشبه المتوسط العام لتركيب القشرة القارية ، فإن تركيب الصهارة المتكونة يكون ريوليتيا .

3- أصل الصهارة الريوليتية

تدعم الحقيقتان التاليتان افتراض الأصل القارى للصهارة الريوليتية:

أ - تنحصر البراكين التى تنبثق منها الصهارة الريوليتية فى القشرة القارية أو فى مناطق البراكين الأنديزيتية.

ب - تطلق البراكين التى تنبثق منها الصهارة الريوليتية، كميات ضخمة من بخار الماء ، كما أن الصخور النارية المتداخلة والمتكونة من الصهارة الريوليتية

وحجم الجسم الناري المتداخل والذي يمكن أن يتكون من غرف الصهارة. ولقد أدت الدراسات إلى وصف وتصنيف عديد من أشكال الصخور النارية المتداخلة (شكل 12.4) ومنها ما يلي :

أ. البلوتونات

تسمى كل الأجسام المتداخلة من الصخور النارية ، بغض النظر عن حجمها وشكلها ، بالبلوتونات **plutons** . ويتراوح حجم هذه الأجسام بين عدة سنتيمترات مكعبة ومئات الكيلومترات المكعبة . ومن السهل الوصول لهذه الأجسام حين تظهر على سطح الأرض نتيجة عمليات الرفع والتعرية لصخور القشرة الأرضية ، أو حين تقطعها الآبار العميقة أو المناجم . وتختلف البلوتونات ليس في الشكل والحجم فقط ، بل في علاقتها بالصخور المحيطة أيضا . وجدير بالملاحظة أن بعض الجيولوجيين يقصرون استخدام مصطلح بلوتون على الأجسام النارية الكبيرة المتكونة في العمق ، ويترأخ حجمها بين كيلومتر واحد ومئات الكيلومترات المكعبة .

ويعكس هذا التنوع الواسع اختلاف طرق تداخل الصهارة أثناء صعودها في القشرة . وتداخل معظم الصهارات في الأعماق الكبيرة التي تزيد عن 8 إلى 10 كم ، حيث يتواجد القليل من الكسور أو الفتحات لأن الضغط العالي للصخور التي تعلو الصهارة يخلق مثل هذه الفتحات . ومع ذلك فإنه يتم التغلب على هذا الضغط من الصهارة الصاعدة . وتكون الصهارات الصاعدة مكانا لها في القشرة بوحدة من الطرق الثلاث الآتية :

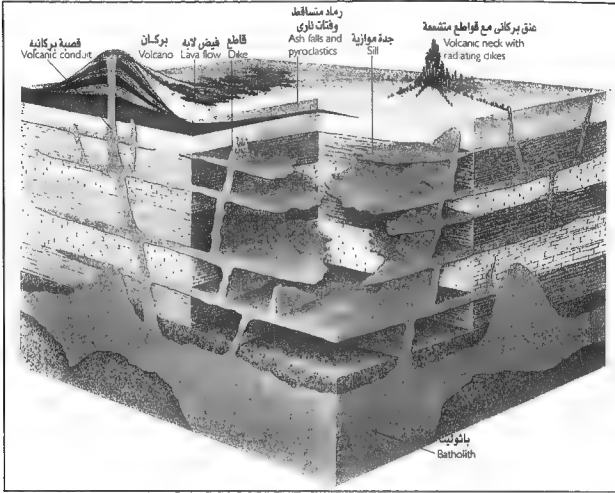
1 - باقتحام الصخور التي تعلوها : تقوم الصهارة برفع الوزن الضخم من الصخور التي تعلوها ، مما يترتب عليه تكسير هذه الصخور فتقتحمها الصهارة وتتحشر بداخلها . وهكذا تنساب

وبمجرد تكون الصهارة الريوليتية ، فإنها تبدأ في الصعود لأعلى ببطء ، حيث تكون لزجة نتيجة احتوائها على نسبة عالية من السيليكا SiO_2 (نحو 70٪) . وأثناء صعود الصهارة ببطء فإن الضغط يقل عليها ، وبالتالي يقل أثر الماء كعامل لخفض درجة حرارة الانصهار ، حيث تؤدي زيادة الضغط إلى زيادة كمية الماء القابل للذوبان في الصهير .

وإذا لم تتوافر الظروف التي تعمل على رفع درجة حرارة الانصهار ، فإن الصهارة الصاعدة والمتكونة بالانصهار الجزئي لصخور تحتوى على الماء تتصلب وتكون صخوراً نارية متداخلة في الأعماق تحت سطح الأرض ، حيث إن الصهارة الصاعدة تقابل صخوراً باردة ولا يوجد مصدر لرفع درجة الحرارة في طريقها . ولذلك تقرب درجة حرارة جسم الصهارة الريوليتية الصاعد من درجة حرارة التصلب تحت سطح الأرض ، وتتكون متداخلات من الصخور الجرانيتية بدلا من الانبثاق فوق سطح الأرض لتتكون لابة ريوليتية أو فتات ناري .

٧. أشكال المتداخلات الصهارية

بالطبع لا يمكن تتبع أشكال الصخور النارية المتداخلة أثناء تداخل الصهارات في القشرة الأرضية . إلا أننا يمكن أن نستنتج أشكالها الآن من خلال العمل الحقل الجيولوجي ، الذي يقوم على رسم الخرائط ومقارنة المكتشفات البعيدة ثم إعادة تحليل تاريخها ، بعد عدة ملايين من السنين من تكون هذه الصخور ورفعها وتعرضها لعملية التعرية . ومع ذلك ، فإننا نملك بعض الأدلة غير المباشرة على النشاط الصهاري الحالي . فعلى سبيل المثال ، تظهر لنا موجات الزلازل الحدود العامة الخارجية لغرف الصهارة التي تتواجد تحت بعض البراكين النشطة ، إلا أنها لا تستطيع التنبؤ بشكل



شكل (12.4): الأشكال الأساسية لتواجد الصخور النارية فوق سطح الأرض: صخور نارية منبثقة extrusive igneous rocks (بركانية volcanic)، وتحت: صخور نارية متداخلة intrusive igneous rocks. لاحظ أن القواطع dikes تقطع طبقات الصخور المحيطة، بينما تمتد الجدد الموازية sills موازية لتلك الطبقات. وتعتبر الباتوليتات أكبر أشكال تواجد الصخور النارية المتداخلة. (After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition, W. H. Freeman and Company, New York).

الصهارة في بعض المناطق، وهو ما يعرف بالتمائل assimilation.

الصهارة داخل الصخور. وقد تقوس الصخور التي تعلوها خلال هذه العملية.

3- صهر الصخور المحيطة: قد تشق الصهارة طريقها أيضاً عن طريق صهر الصخور المحيطة بها. ويوضح (شكل 9.4) الطرق الثلاث لتدخّل الصهارة.

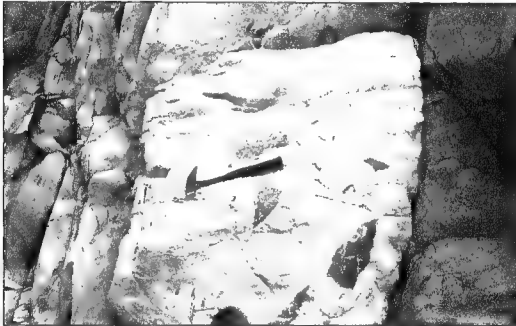
2- كسر كتل كبيرة من الصخور: تشق الصهارة طريقها لأعلى في صخور القشرة المتكسرة، وتسقط كتل من هذه الصخور في الصهارة وتنصهر وتذوب في الصهر، مما قد يؤدي إلى تغيير تركيب

والجرنة **granitization** هي العملية التي يتكون بها الجرانيت من صخور أخرى سابقة بإعادة التبلور، مع حدوث انصهار كامل أو دون أى انصهار .

1. الباثوليثات

تعتبر الباثوليثات **batholiths** أكبر البلوتونات حجما ، حيث تتكون من كتلة ضخمة غير منتظمة من

وقد توجد أحيانا صخور دخيلة **xenoliths** في بعض المتداخلات ، والتي تتكون من قطع من صخور المنطقة ، وتكون محاطة بالكامل بالمادة المتداخلة . وهذه القطع الصخرية التي كانت طافية في الصهارة المتداخلة (شكل 13.4) ، دليل جيد على اقترحام الصهارة للصخور المحيطة أثناء تكوّن الجسم الناري . ويكون لمعظم البلوتونات حدود تلامس حادة



شكل (13.4): صخور دخيلة **xenoliths** في جرانيت طريق قفط - القصير - الصحراء الشرقية - مصر (أ. د. محمود عبد الغفور حسن . هيئة المواد النووية)

صخور نارية خشنة التبلور ، تغطى 100 كم² على الأقل (شكل 12.4) . وتسمى البلوتونات الأصغر بالكتلة الشاخصة أو الاستوك **stock** . وعندما تأخذ الكتلة الشاخصة شكلا مستديرا فإنها تعرف بالحدبة **boss** . وتكون كل من البلوتونات والكتل الشاخصة عبارة عن متداخلات غير متطابقة **discordant**

sharp contacts مع الصخور المحيطة. كما توجد أدلة أخرى على تداخل هذه الأجسام على هيئة صهارة سائلة في الصخور الصلبة. وقد تتداخل بعض البلوتونات في الصخور المحيطة فتؤدى إلى تكوّن بعض التراكيب التي تشبه تراكيب الصخور الرسوبية. وتؤدى هذه الظواهر إلى الاعتقاد بأن هذه البلوتونات قد تكونت من صخور رسوبية سابقة ، بعملية الجرننة .

sills عبارة عن متداخلات متطابقة **concordant intrusions** ، أى تكون حدودها موازية للطبقات المحيطة بها . وتتكون من أجسام مسطحة (صفائح) منبسطة مستوية الأسطح تكونت نتيجة حقن الصهارة فى صخور سابقة متطبقة ويسين طبقتين متوازيتين (شكلا: 4. 12 و 4. 14) . ويتراوح سمك الجدة الموازية بين سنتيمترات قليلة ومئات الأمتار ، كما قد تمتد هذه الجدة لمسافات بعيدة .

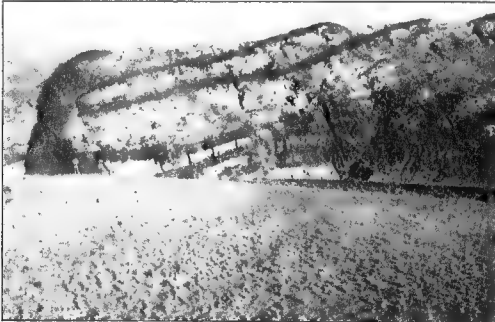
وتعتبر القواطع **dikes** هى الطرق الرئيسية لانتقال الصهارة فى القشرة . وهى تشبه الجدد الموازية فى أنها أجسام نارية مستوية السطح ، إلا أن القواطع تقطع طبقات الصخور المحيطة (شكل 4. 12 و 4. 14) . أما الجدد الموازية فتكون موازية لها . وتتكون القواطع أحيانا نتيجة الحقن فى كسور قديمة موجودة قبل الحقن ، إلا أنها غالبا ما تفتح قنوات (فتحات) خلال

intrusions ، أى تقطع طبقات الصخور المحيطة التى تتداخل فيها هذه الأجسام النارية .

وتتواجد الباثوليثات فى لب سلاسل الجبال المشوهة تكتونيا (بنائيا) . ولقد أظهرت المشاهدات الحقلية أن الباثوليثات عبارة عن أجسام تشبه الفرش الأفقية ، أو أجسام سميكة مفصصة تمتد من جزء أوسط يشبه القمع . وقد تمتد أعماق الباثوليثات إلى 10 أو 15 كم ، بينما قد يمتد بعضها الآخر إلى أعماق أكبر . ويظهر التبلور الحشن لصخور الباثوليثات ، أنها تتبلور فى أعماق كبيرة ، ونتيجة تبريد بطيء .

2. الجدد الموازية والقواطع

تختلف الجدد الموازية والقواطع عن الباثوليثات فى جوانب عدة ، منها أنها تكون أصغر حجما ، كما ترتبط بالصخور المحيطة بها بعلاقات مختلفة . والجدد الموازية



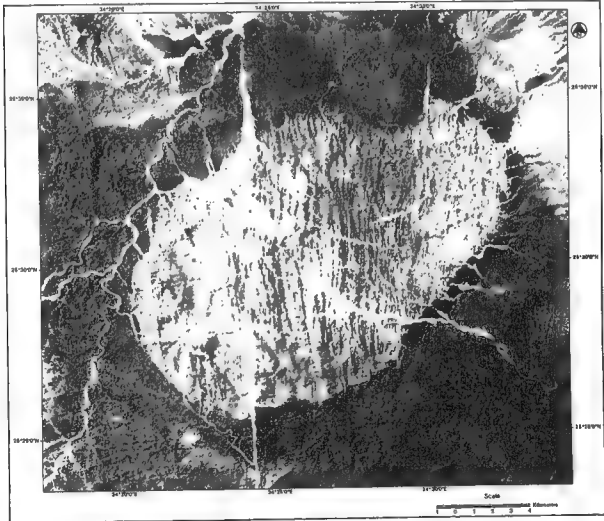
شكل (4. 14): جدد موازية sill تمتد موازية لصخور الست المحيطة ، بينما يظهر على يسار الصورة قاطع dyke يقطع صخور الست . وادى أم غيج - الصحراء الشرقية - مصر .

الجلدة تتكون من حقن الصهير بين طبقتين من الصخور الرسوبية قرب سطح الأرض . أما اللاكوليث فيتكون من صهير غنى بالسيليكا، يميز بدرجة لزوجة أعلى من الصهارات المافية . لذلك فإنه يتجمع على هيئة كتلة عدسية الشكل تشبه فطر عيش الغراب ، وتعمل على تقوس الصخور التي تعلوها . أما قناع اللاكوليث فيكون مسطحا (شكل 11.5) . ويتراوح قطر اللاكوليث من 1 إلى 8 كم . ويصل أقصى سمك لها إلى نحو 1000 كم . وقد تأخذ الأجسام النارية شكل طبق تحت سطح الأرض ، وتعرف حينئذٍ باللوبوليث lopolith ، أو تأخذ شكل سرجا وتعرف بالفاكوليث phacolith .

كسور جديدة تحت ضغط الحقن الصهارى . وجددير بالذكر أن بعض القواطع يمكن تتبعها لعشرات الكيلومترات . ويتراوح سمك القواطع من عدة أمتار إلى سنتيمترات قليلة .

ونادرا ما توجد القواطع مفردة ، حيث تتواجد عادة في أعداد كبيرة ، أو على هيئة حشود dyke swarms مكونة من مئات أو آلاف القواطع (شكل 15.4) . وقد تكون هذه المجموعات من القواطع متوازية ، أو شعاعية أو متجاوزة en echelon حيث قد تكون خرجت من مصدر صهارى واحد .

يشبه اللاكوليث laccolith الجلدة الموازية في أن



شكل (15.4) صورة فضائية توضح حشودا من القواطع dyke swarms تقطع الصخور الجرابية كدابورا . وسط الصحراء الشرقية - مصر .

أثناء تكوّن العروق . وسيتّم مناقشة العروق الحرمائية وما تحويه من خامات ذات قيمة اقتصادية في الفصل التاسع عشر من الكتاب.

IV. النشاط الناري وتكونية الألواح

لقد أمكن تحديد درجات الحرارة والضغط التي تنصهر عندها الأنواع المختلفة من الصخور من التجارب المعملية . وتعطينا هذه النتائج فكرة عن الأماكن التي يمكن أن يحدث فيها الانصهار . فالبازلت ينصهر عند درجة حرارة تزيد بمئات الدرجات عن درجة انصهار خليط من الصخور الرسوبية ؛ مما يعنى أن البازلت يبدأ في الانصهار في الأماكن النشطة تكتونيا من الوشاح بالقرب من الحد السفلى للقشرة ، بينما تنصهر الصخور الرسوبية عند أعماق أقل من البازلت . وترتبط طريقة حركة اللوح بين النشاط التكتوني وتركيب الصخور المنصهرة .

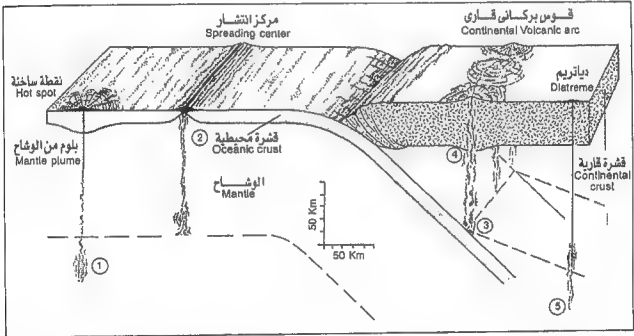
وهناك نوعان من حدود الألواح يصاحبها تكوين الصهارات وهى حيويد وسط المحيط حيث يتباعد لوحان ويحدث انتشار لقاع المحيط ، ونطاقات الاندساس حيث يؤدى تقارب لوحين إلى أن يندس أحدهما تحت الآخر (شكل 16.4) . وتتواجد معظم أماكن تكوّن الصخور النارية عند نطاقات التباعد - أي عند حيويد وسط المحيط mid-ocean ridges - حيث يتكون البازلت نتيجة الانصهار الجزئى للوشاح ويصعد مع تيارات الحمل الدورانية الصاعدة . وتنبثق الصهارة على هيئة لابات، يتم تغذيتها من غرف الصهارة أسفل محور حيويد وسط المحيط ، بينما تقتحم (تتموضع) متداخلات صخور الجابرو في الوقت نفسه ولكن في أعماق أكبر .

العروق veins عبارة عن رواسب من المعادن مرتبطة بالأجسام النارية القريبة وتكون غريبة عن الصخور المحيطة بها . وهى تشبه القواطع في أنها تمثّل فراغات الصخور المحيطة . وقد تنشأ العروق على هيئة أجسام غير منتظمة أو على شكل صفائح منبسطة أو مستدقة مثل القلم، تنفرع من قمة وجوانب عديد من المتداخلات النارية . ويتراوح عرض العروق بين عدة ميليمترات وعدة أمتار، بينما يتراوح طولها بين عشرات الأمتار والكيلومترات . وأكثر أنواع العروق شيوعا عروق الكوارتز، حيث يكوّن معدن الكوارتز معظم العرق ، بالإضافة إلى بعض الكريستيدات والفليزات العنصرية مثل الذهب أو الفضة التى تتواجد بنسب ضئيلة للغاية . وتسمى العروق المتكونة من صخور الجرانيت خشنة التبلور جدا بالجسمائيت pegmatites حيث تبلغ البلورات عدة مستيمترات (شكل 2.4) أو حتى عدة أمتار طولا . وتبلور تلك العروق في المراحل النهائية لتصلب صهارة غنية بالماء . وتحتوى الجسمائيت على خامات من العناصر النادرة والفليزات الثقيلة .

وتكون بعض العروق مملئة بالمعادن التى تحتوى على كميات كبيرة من الماء المرتبط كيميائيا بالمعادن ، والتى تبلور من محاليل مائية ساخنة . وتظهر التجارب المعملية أن هذه المعادن تبلور عند درجات حرارة مرتفعة تتراوح بين 250°م إلى 350°م ، وهى درجة أقل من درجة حرارة الصهارات عموما . ويوضح تركيب المعادن في هذه العروق الحرمائية hydrothermal veins (من الكلمة اليونانية hydro بمعنى ماء ، و thermal بمعنى حرارة) أن الماء كان متواجدا بوفرة

تحتوي على كميات كبيرة من الماء ، لذلك فإن هذه المواد تتميز بدرجات انصهار أقل من درجة انصهار القشرة أو الوشاح الجافين اللذين لا يحتويان على هذه الكميات من الماء. وعندما يتحرك اللوح الصخري إلى أعماق أكبر ترتفع درجات الحرارة حتى تصل إلى درجة انصهار الصخور الرسوبية أو الصخور المتحولة. وباستمرار الحركة إلى أسفل، يقابل اللوح في النهاية درجات حرارة كافية لصهر الأجزاء العلوية من البازلت. وهكذا، فإن الاندساس يؤدي إلى تكون صهارة ، أو ربما عدة صهارات مختلفة الأنواع.

أما نطاقات الاندساس subduction zones حيث يندس لوح تحت آخر، فهي أكثر مواقع انصهار الصخور. حيث تحتوي قمة اللوح الصخري المندرس على قشرة محيطية متكونة أساساً من البازلت الذي نشأ أصلاً عند حيد وسط المحيط ، وبالإضافة إلى ذلك يحمل اللوح الماء ورسوبيات محيطية لينة تجمعت أثناء حركة اللوح من حيد وسط المحيط إلى نطاق الاندساس. ويقابل اللوح أثناء حركته إلى أسفل درجات حرارة متزايدة وضغط مما يؤدي إلى تحول الرسوبيات أولاً إلى صخور رسوبية ثم إلى صخور متحولة عند الأعماق الأكبر. وحيث إن هذه الصخور



شكل (16.4): مواضع تكون الصهارات وعلاقتها بتكتونية الألواح

1. تتكون صهارة بازلتية في الأجزاء السفلى من الوشاح تصعد خلال بلوم plum (سلسلة جزر بركانية داخل الألواح المحيطية وبعضها من حدود تلك الألواح).
2. تتكون صهارة بازلتية في الأجزاء العليا من الوشاح تحت مركز انتشار spreading center (عند حيد وسط المحيط mid-ocean ridge).
3. تتكون صهارة مالفية إلى متوسطة عندما تتقابل قمة لوح صخري مندرس مع قاعدة لوح علوي راكب overriding plate.
4. تتكون صهارات تفرّاح من بازلتية إلى ريويتية نتيجة تفاعل صهارة صاعدة مع قاع قشرة قارية.
5. تتكون صهارة فوقبازلتية في الأجزاء السفلى من الوشاح لتصعد وتكون صخر الكمبرليت، وهو الصخر الذي لا يوجد الماس إلا فيه. ويمثل الخط المتقطع قاعدة الغلاف الصخري.

(After Raymond, L.A., 1995: Petrology: The study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic rocks. Wm. C. Brown Publishers).

بلومات الوشاح : يعتقد العلماء أن النقاط الساخنة **hot spots** تمثل تعبيرا عن البلومات **plumes** الصاعدة باستمرار والمستولة عن تدفق كميات ضخمة من البازلت؛ حيث يتواجد هذا البازلت فوق بعض القارات بعيدا عن حدود الألواح في تتابعات سميكة مماثلة لتلك الموجودة عند حيود وسط المحيط . ومن أمثلة هذا البازلت ، ذلك الموجود في ولايات واشنطن وأوراجون وإيداهو في الولايات المتحدة الأمريكية حيث يغطي البازلت مساحات شاسعة ، نتيجة تدفق اللابات ملايين السنين . كما انبثقت أيضا كميات كبيرة من البازلت من جزر بركانية منفصلة بعيدا عن حيود الألواح المحيطية ، مثل جزر هاواي في وسط اللوح الهادئ . وفي مثل هذه المناطق تصعد البلومات الرقيقة التي تشبه ريشة الرسام أو قلم الرصاص من صهارات البازلت الساخنة من أعماق الوشاح ، وربما من أعماق تصل إلى قرب الحد بين اللب والوشاح .

والخلاصة أن صهارات البازلت تتكون في الأجزاء العليا من الوشاح أسفل حيود وسط المحيط ، وفي الأجزاء السفلى من الوشاح أسفل النقاط الساخنة داخل الألواح . وتتكون صهارات مختلفة التركيب في نطاقات الاندساس اعتمادا على كمية المواد الفلسية والماء الذي تساهم به الصخور فوق نطاق الاندساس في الصخور المنصهرة.

الملخص

- 1 - تقسم الصخور النارية إلى قسمين رئيسيين بناءً على نوع النسيج ، وهما :
صخور خشنة التبلور وتميز الصخور المتداخلة ، حيث كان التبريد بطيئا ، وصخور دقيقة التبلور تميز الصخور المنبثقة (البركانية) ، حيث كان التبريد سريعا . وتشمل الصخور المنبثقة اللابات المتصلبة

وحينا تتصاعد الصهارات والماء الناتجة من التفاعلات التي تؤدي إلى انتزاع الماء من قمة اللوح المندهس المنصهر ، فإنها قد تسبب انصهار أجزاء من اللوح العلوي فوق نطاق الاندساس وتغير تركيبه . كما قد تتأيز الصهارات بالتبلور التجزيئي ، ويكون نتيجة لذلك صخور نارية متداخلة ومنبثقة (بركانية) . وتنبثق من البراكين فوق الأجزاء العميقة من نطاق الاندساس لابات بازلتية وأنديزيتية وريوليتية وفتات نارى ، مكونة بذلك أنواعا عديدة من الصخور البركانية . وتكون هذه البراكين والبركانيات المندفعة منها أقواس جزر محيطية **island arcs** بركانية مثل جزر الإليوشان في الأسكا .

أما إذا حدث الاندساس أسفل قارة ، فإن عديدا من كتل البراكين والصخور البركانية تلتحم ببعضها بعضا لتكون قوسا بركانيا **volcanic arcs** (قوس جبلى **mountainous arc**) على الأرض . ومن أمثلة اندساس لوح محيطي أسفل آخر قارى تكون سلسلة جبال الأنديز والكاسكيد المتواجدة على هيئة قوس من البراكين النشطة ، تضم بركان جبل سانت هيلين في شمال كاليفورنيا ، وأوريغون وواشنطن . وبينما تتكون الجبال فوق القارات ، تبلور الصهارات المتداخلة في الأعماق لتكون صخورا نارية تتراوح من المافية إلى الفلسية تبعا لتركيب الصهارة ودرجة التمايز .

وتعتبر جزر اليابان مثالا للمتداخلات والانبثاقات المعقدة التي تكونت وتطورت في نطاق اندساس عبر ملايين السنين . وفي كل مكان من هذا البلد الصغير ، توجد كل أنواع الصخور النارية المنبثقة من أعماق مختلفة ، والتي تداخلت مع صخور بركانية متحولة وصخور متداخلة متوسطة ومافية وصخور رسوبية تكونت نتيجة تعريه الصخور النارية .

أكبر من البلورات الأكثر مافية ، والتي تكونت في المراحل المبكرة.

4 - تشرح سلسلتى بوين التفاعلية المتصلة وغير المتصلة كيف تتكون صخور نارية مافية نتيجة التبلور التجزئى فى المراحل المبكرة للتبلور والتأثير بينما تتكون صخور فلسية فى المراحل النهائية. ولكن تفشل نظرية بوين فى شرح تواجد صخور الجرانيت بوفرة.

5 - تتكون الصهارات فى الأماكن السفلية من القشرة وفى الأجزاء العليا من الوشاح حيث ترتفع درجة الحرارة والضغط بدرجة تكفى للانصهار الجزئى للصخور المحتوية على الماء.

(أ) قد يؤدى الانصهار الجزئى للصخور الجافة فى الأجزاء العليا من الوشاح إلى تكوّن صهارة بازلتية.

(ب) قد ينصهر خليط من الصخور الرسوبية والصخور البازلتية المحيطة الموجودة المشبعة بالماء فى نطاقات الاندساس مما يؤدى إلى تكون صهارة أنديزيتية ، كما تنشأ الصهارة الأنديزيتية أيضا نتيجة الانصهار الكامل لجزء من القشرة القارية.

(ج) قد يؤدى انصهار خليط من الصخور الرسوبية والنارية والمتحولة فى أسفل القشرة القارية إلى تكوّن صهارة ريوليتية (جرانيتية). وتساهم عمليتى التمثل واختلاط الصهارات فى نشأة صهارات ذات تركيبات كيميائية مختلفة .

6 - تسمى كل الأجسام المتداخلة من الصخور النارية بغض النظر عن شكلها أو حجمها أو علاقتها بالصخور المحيطة بالبلوتونات . وتعتبر

والصهارات الصاعدة إلى سطح الأرض والصخور الفتاتية النارية التى تتكون من كسرات الفتات النارى (بلورات أو زجاج أو صخور).

2 - كما تصنف الصخور النارية (المتداخلة والمنبتقة) على أساس كيميائى طبقاً لمحتواها من السيليكا ، أو على أساس التركيب المعدنى حسب نسبة المعادن الفلسية فاتحة اللون، والمعادن المافية داكنة اللون . ويتميز الصخور الفلسية مثل الجرانيت ويقابله الريوليت من الصخور المنبتقة بأنها غنية فى عنصر السيليكا (صخور حامضية) . كما تتميز بسيادة الكوارتز والفلسبار البوتاسى وفلسبار البلاجيوكليز الغنى بالصوديوم . بينما تتميز الصخور المافية مثل الجابرو ويقابله البازلت من الصخور المنبتقة ، بأنها تكون فقيرة فى نسبة السيليكا ، وتتكون أساسا من البيروكسين والأوليفين وفلسبار البلاجيوكليز الغنى بالكالسيوم . وتشمل الصخور المتوسطة صخور الجرانوديوريت والديوريت ويقابلها من الصخور المنبتقة الداسيت والأنديزيت.

3 - تتبلور المعادن من الصهارات فى سلسلتين هما سلسلة تفاعل متصلة لفلسبار البلاجيوكليز وسلسلة تفاعل غير متصلة للمعادن المافية . وتتفاعل البلورات الناشئة من هاتين السلسلتين مع الصهير باستمرار فى مراحل متتابعة من التبلور وتغير تركيب الصهارة حتى تتصلب تماما عند نقطة يكون فيها الصخر النهائى له تركيب الصهارة الأصلية نفسها. ويحدث التبلور التجزئى ، حين لا تتفاعل البلورات مع الصخور بسبب نمو البلورات بسرعة أو بسبب فصل البلورات من الصهير . ويتميز البلورات النهائية بنسبة سيليكات

الأجزاء العليا للوشاح ، ونطاقات الاندساس حيث يؤدي اندساس قشرة محيطية في أعماق القشرة والأجزاء العليا من الوشاح إلى تكوّن سلسلة من الصهارات المتمايزة تؤدي إلى تكوّن صخور متداخلة وصخور منبثقة في أقواس جزر بركانية أو أقواس بركانية فوق القارات . وبالإضافة إلى المواقع السابقة ، تتكون أحجام كبيرة من البازلت في الجزر المحيطية أو فوق الكتل القارية داخل الألواح نتيجة تواجدها فوق بلومات صاعدة من الوشاح.

الباثوليثات أكبر البلوتونات حجما . بينما يعتبر الاستوك أقل حجما من الباثوليثات . وتتداخل الجدد الموازية متدفقة بين طبقات الصخور المحيطة وموازية لها . أما القواطع فإنها تشبه الجدد الموازية وتختلف عنها في أنها تقطع طبقات الصخور التي تتداخل فيها . وتتكون العروق الحرماية حيث يتواجد الماء بوفرة إما في الصهارة وإما في الصخور المحيطة .

7 - تشير العلاقة بين الصخور النارية وتكتونية الألواح إلى أن هناك مكانين رئيسيين للنشاط الصهاري هما حيود وسط المحيط حيث يتصاعد البازلت من

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

<http://www.prenhall.com/tarbuck>

<http://www.mhhe.com/earthsci/geology/plummer-old/www.mhmtl>

<http://www.geolab.unc.edu/Petunia/IqMetAtlas/plutonic-micro%7F/plutonicmicro.html>

المصطلحات المهمة

andasil	أنديزيت	magma chamber	حجرة صهارة
assimilation	تمثل	magma mixing	اختلاط الصهارات
basalt	بازلت	magmatic differentiation	تمايز صهاري
batholiths	بانوليثات	obsidian	أوبسيديان
concordant intrusions	متداخلات متطابقة	partial melt	مصهور جزئي
continuous reaction series	سلسلة التفاعل المتصلة	partial melting	انصهار جزئي
country rocks	صخور المنطقة أو الإقليم	pegmatite	بجمايت
dacite	داسيت	peridotite	بريدوتيت
dike	قاطع (ج. قواطع)	plumes	بلومات
diorite	ديوريت	plutons	بلوتونات
discontinuous reaction series	سلسلة التفاعل غير المتصلة	pumice	بيومس
discordant intrusions	متداخلات غير متطابقة	pyroclastic rocks	صخور فتاتية نارية
extrusive igneous rocks	صخور نارية منبثقة	pyroclasts	فتات ناري
felsic	فلسي	rhyolite	ريوليت
fractional crystallization	تبلور تفردي	sill	جدة موازية (ج. جدد موازية)
gabbro	جابرو	stock	كتلة شاخصة أو استوك
glass	زجاج	texture	نسيج
granite	جرانيت	ultramafic rock	صخر فوقهاي
granitization	جرنتة	veins	عروق
granodiorite	جرانوديوريت	viscosity	لزوجة
hot spots	نقاط ساخنة	volcanic ash	رماد بركاني
hydrothermal veins	عروق حرماية	volcanic rocks	صخور بركانية
intrusive igneous rocks	صخور نارية متداخلة	xenoliths	صخور دخيلة
laccolith	لاكوليث	zoned crystal	بلورة متمنطقة
lava	لاية		
mafic	مافي		
magma	صهارة		

الأسئلة

1. لماذا تكوّن الصخور النارية المتداخلة خشنة التبلور والصخور النارية المنبثقة دقيقة التبلور؟
2. اذكر أنواع المعادن التي توجد في صخر نارى مافى.
3. ما أنواع الصخور النارية التى تحتوى على الكوارتز؟
4. اذكر اسمى صخرين ناريين متداخلين يحتويان على نسبة من السيليكات أعلى من تلك الموجودة فى الجابرو.
5. ما الفرق بين السلسلتين التفاعلتين المتصلة وغير المتصلة؟
6. كيف يؤدى التبلور التجزئى إلى التمايز الصهارى؟
7. اذكر أين يمكنك أن تجد انصهارا جزئيا لتركيب بازلتى فى القشرة أو الوشاح أو اللب .
8. كيف يمكن أن نميز بين القاطع والجدة الموازية؟
9. اذكر الأدلة الحقلية التى تستخدم للتأكد من أن البازلت تكوّن كقاطع أو لابة مناسبة.
10. اذكر فى أى مواقع تكتونية الألواح يمكن أن نتوقع تكوّن صهارات .
11. لماذا تهاجر الصهارات لأعلى ؟
12. اذكر من أين تنبثق الصهارات البازلتية فوق قاع المحيط ز

الفصل

5

البراكين

I. مصدر اللابات

II. الصخور والغازات التي تقذفها البراكين :

أ- الغازات

ب- اللابات :

1. أنواع اللابات

2. أنسجة اللابات

ج - الرواسب الفتاتية النارية :

1. المقذوفات البركانية

2. فيض الفتات الناري

III. أنواع الانبثاقات ومعالها :

أ - الانبثاقات المركزية :

1. البراكين الدرعية

2. القباب البركانية

3. مخاريط الحمم الفتاتية

4. البراكين المركبة

5. فوهات البراكين والمعالم البركانية الأخرى

ب - الانبثاقات الشقية :

1. بازلت فيضي (الهضاب البازلتي)

2. رواسب فيض الرماد

ج - بعض الظواهر البركانية الأخرى :

1. اللاهار

2. السداحات والينابيع الحارة والفوارات

(والجيزارات) :

IV. التبركن وتكتونية الألواح :

أ - التبركن عند حدود الألواح المتباعدة (تبركن نطاق الانتشار)

ب - التبركن عند الحدود المتقاربة (تبركن نطاق التقارب)

1. التبركن في التقارب المحيطي - المحيطي

2. التبركن في التقارب المحيطي - القاري

ج - التبركن داخل الألواح

V. البراكين والمناخ

VI. تقليل مخاطر كوارث البراكين

VII. الاستفادة من البراكين

الصحارة من داخل الأرض خلال القشرة الأرضية لتظهر على السطح على هيئة لابة، وتبرد لتكوّن صخورا بركانيا صلبا. وتكون الصخور البركانية نحو 80٪ من القشرة الأرضية، سواء كانت محيطية أو قارية.

وسوف نتناول في هذا الفصل أيضا الأنواع الرئيسية للابات، وأنواع الثورات والملاحم التضاريسية التي تكوّننا، وأنواع التلوث البيئي التي تسببها البراكين، حيث يمكن اعتبار البراكين نافذة يمكن من خلالها ملاحظة باطن الأرض. كما سنوضح في هذا الفصل أيضا كيف يمكن أن تفسر تكتونية الألواح وجود معظم البراكين عند حواف الألواح، مع وجود القليل منها فوق النقاط الساخنة hot spots داخل الألواح. وفي النهاية، سنتناقش كيفية التحكم في الطاقة التدميرية للبراكين، والاستفادة من الطاقة الحرارية الناشئة عنها والعناصر الكيميائية المصاحبة لها.

١. مصدر اللابات

روعت ثورات البراكين والمواد المصاحبة لها قدامى الفلاسفة، مما حدا بهم لنسج الأساطير عن عالم شيطاني ساخن تحت سطح الأرض. وقد كانت فكرة القدامى صحيحة، حيث لا يجد الجيولوجيون الآن دليلا على طبيعة الحرارة الداخلية للأرض غير البراكين.

وتظهر نتائج تسجيل درجات الحرارة أثناء حفر الآبار العميقة في الأرض (نحو 10 كم) أن درجة حرارة الأرض تزداد بزيادة العمق، حيث ترتفع درجة الحرارة بمعدل 30°م لكل كيلومتر عمقا. ويعتقد الآن أن درجات الحرارة تصل إلى 1100°م وإلى 1200°م

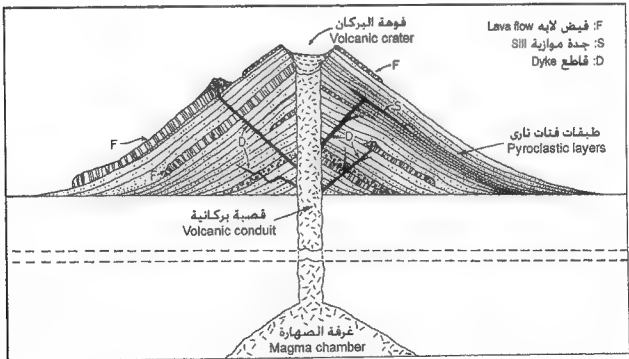
كان جبل سانت هيلين Mount St. Helens ولاية واشنطن بركانا غروطيا عاليا يصل ارتفاعه إلى 2950 مترا صباح يوم 18 مايو 1980م، وعند الغروب أصبح جبلا قبيحا يبلغ ارتفاعه 2550 مترا، تغطيه سحابة من الغازات والرماد تصاعدت من فوهة جديدة أخذت شكل حدوة الحصان. وقد أزال الانهيار الكتل الضخم الجانب الشمالي للجبل تماما، مسببا انفجارا ضخما مزق قمة الجبل، ودمر غابة بها نحو عشرة ملايين شجرة وقتل 57 شخصا. كما اندفعت من البركان سحابة ضخمة من الغازات والرماد لأعلى، وصلت درجة حرارتها إلى نحو 800°م، غطت وسط واشنطن، وامتدت شرقا إلى الشاطئ خلال الأيام الثلاثة التالية. واندفع العاملون بالبراكين من كل أنحاء العالم نحو ولاية واشنطن ليجدوا إجابات عن أسئلتهم: ماذا حدث؟، ولماذا؟. بالإضافة إلى أسئلة أخرى عن الدروس المستفادة مما حدث في جبل سانت هيلين للاستفادة بها في مناطق أخرى بها براكين خطيرة.

ويقع بركان سانت هيلين وبراكين أخرى نشطة على امتداد "حلقة النار" Ring of fire، وهي حزام من الجبال الخديشة والزلازل والبراكين تحيط بالمحيط الهادئ، ولذا يعرف باسم الحزام حول الهادئ circum-Pacific belt. وهنا يبرز السؤال: لماذا لا توجد البراكين موزعة عشوائيا في مختلف أنحاء العالم؟، ولماذا هي شائعة في مناطق أكثر من الأخرى؟. وللإجابة على هذه الأسئلة وغيرها حول موضوع البراكين، كان هذا الفصل الذي يتناول لتبرن volcanism، وهي العملية التي تصعد بها

الغلاف الصخري ، أو بصهر الصخور . وقد تصل بعض الصهارة في النهاية إلى سطح الأرض وتنبثق على هيئة لابة .

والبركان **volcano** مصطلح مشتق من اسم إله النار عند الرومان والمسمى فولكان **Vulcan** ، وهو عبارة عن تل أو جبل ، يأخذ عادة شكلا مخروطيا ، تتكوّن من تراكم مواد تنبثق على سطح الأرض . ويمثل شكل (1.5) رسما تخطيطيا لبركان يوضح النظام الموجود بالبراكين ، والذي يشبه نظام خطوط أنابيب المياه ، والذي يؤدي إلى دفع الصخور المنصهرة في الأعماق من غرفة الصهارة ، وينشئ خرجا لها عند سطح الأرض ، تصعد منه الصهارة خلال قناة تشبه الأنبوب تعرف بالعنق المركزي (مخرج) **central vent** أو القصبة البركانية **volcanic conduit** للبركان . وتوجد فوق المخرج المركزي حفرة على شكل قمع تعرف بفوهة البركان **crater** . (انظر شكل 1.5

عند أعماق الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) ، والذي يمتد من نحو 100 إلى 350 كم . وهي درجة حرارة عالية بما يكفي لأن تبدأ عندها الصخور في الانصهار . ولذلك يعتقد الجيولوجيون أن الغلاف اللدن هو المصدر الرئيسي للصهارة **magma** ، وهي الصخور المنصهرة تحت سطح الأرض ، والتي تعرف باللابة **lava** عندما تنبثق فوق سطح الأرض . ويستخدم مصطلح اللابة للدلالة أيضا على الصخر الذي تصلدت منه . كما يعتقد أن الانصهار الجزئي **partial melting** لبعض أجزاء الغلاف الصخري الصلب الذي يعلو الغلاف اللدن هو مصدر آخر للصهارة . وتصعد الصهارة كما لو كانت تطفو ، لأن كثافة الأجزاء المنصهرة عند هذه الحرارة تكون أقل من كثافة الصخور المحيطة المتبقية . وتضغط الصخور المحيطة الأكثر كثافة على الصهير لتعصره وتدفعه إلى أعلى . كما قد يجد الصهير طريقة إلى سطح الأرض خلال كسور



شكل (1.5): بركان مركب **composite volcano** يتكون من مخروط وفوهة وعنق مركزي وغرفة صهارة . لاحظ تبادل فيوض اللابة مع طبقات الفئات الناري .

أ. الغازات

تغطي الغازات البركانية وطرق تكوُّنها بأهمية خاصة، حيث يعتقد أنها هي التي كونت مياه المحيطات وغازات الغلاف الجوي خلال الزمن الجيولوجي، بالإضافة إلى أنها يمكن أن تؤثر على الطقس والمناخ أيضا. وقد حُلِّلَ عديد من الغازات البركانية لتحديد تركيبها الكيميائي، ووجد أن بخار الماء هو المكوّن الرئيسي للغاز البركاني حيث يمثل 70 إلى 95٪ من مكوناته، يليه ثاني أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكبريت، بالإضافة إلى كميات ضئيلة من النيتروجين والهيدروجين وأول أكسيد الكربون والكبريت والكلور. وتطلق كل ثورة بركانية كميات هائلة من هذه الغازات (شكل 5.1). وتأتي بعض الغازات البركانية من أعماق الأرض، لتتصعد إلى السطح. وقد تكون بعض الغازات البركانية عبارة عن مياه جوفية أو ماء محيطات دخلت في دورة جديدة، أو غاز من الغلاف الجوي أعيد أيضا في دورة جديدة، أو غاز محبوس في صخور تكوَّنت في مراحل مبكرة.

ب. اللابات

تختلف الأنواع الرئيسية للابات والصخور التي تكوُّنها تبعاً للصهارات التي تتكون منها. حيث تقسم الصهارات والصخور النارية التي نشأت منها إلى ثلاثة أقسام رئيسية، وهي لابات ريوليتية (فلسية) أو أنديزيتية (متوسطة) أو بازلتية (مافية) تبعاً لتركيبها الكيميائي، (انظر الفصل الرابع). كما تقسم الصخور أيضاً إلى صخور متداخلة intrusive (بردت ببطء تحت سطح الأرض وتكون خشنة الحبيبات)، وتعرف أيضاً بالصخور الجوفية plutonic rocks وصخور منبثقة extrusive (بردت فوق سطح الأرض وتكون دقيقة الحبيبات)، وتعرف أيضاً بالصخور البركانية

وشكل 18.5). ويتم ملء غرفة الصهارة القريبة من سطح الأرض أسفل قمة البركان دورياً بالصهارة الصاعدة من أسفل، وتفرغ على السطح في دورات من الثورات. ويمكن أن تنبثق اللابة أيضاً من كسور على جوانب البركان.

ويهتم الجيولوجيون بدراسة اللابة، حيث تعتبر اللابة عينه من باطن الأرض. ولسوء الحظ، فهي ليست عينه مطابقة تماماً، حيث تختلف اللابة عن الصهارة التي توجد في الأعماق. فاللابة فقدت بعض مكوناتها من الغازات في الغلاف الجوي أو المحيط أثناء انبثاقها، كما يمكن أن تفقد الصهارة أو تكتسب بعض المكونات الكيميائية الأخرى أثناء صعودها إلى السطح. وبالرغم من هذه الاختلافات، فإن الصهارة والمواد الأخرى المنبثقة تمدنا بمعلومات مهمة، والتي تعتبر مفتاحاً لفهم التركيب الكيميائي والحالة الفيزيائية للأجزاء العليا من الوشاح. وتدلنا هذه المواد التي تصلبت على هيئة صخور بركانية، على الثورة التي كونت هذه الصخور منذ آلاف أو ملايين السنين. ويؤثر التركيب الكيميائي والمعدني للابات في الطريقة التي تنبثق بها وأشكال التضاريس التي تكوُّنها عندما تتصلب.

II. الصخور والغازات التي تغذفها البراكين

يعتقد الكثيرون أن البراكين لا تغذف إلا اللابة. ولكن هذا اعتقاد غير صحيح في أغلب الأحيان، حيث تغذف البراكين أثناء الثورة الانفجارية كميات هائلة من الفتات الصخري والقذائف البركانية والرماد البركاني الدقيق، والتي لا تقل وفرة عن اللابة. وبالإضافة إلى ذلك، فإن كميات كبيرة من الغازات تغذف من البراكين إلى الغلاف الجوي. ونستعرض فيما يلي أنواع المواد المختلفة التي تغذفها البراكين (جدول 1.5):

جدول (1.5): المواد التي تتخذها البراكين .

الشكل	الاسم	المميزات
غاز	دخان Fume	غازات بركانية تتكون من الماء وثاني أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكبريت وكميات ضئيلة من النيتروجين والهيدروجين وأول أكسيد الكربون والكلورين
سائل	لايات Lavas	آه آه aa باهوى هوى pahoehoe وسائدية pillow
صلب	رماد ash	سطح خشن وكتل سطح ناعم إلى حبل تتكون تحت سطح البحر من تراكم كتل بيضاوية غير متصلة من البازلت تشبه الأكياس أو الوسائد
	فتات نارى Pyroclasts	لويسات (حصى بركانى) كتل قذائف بركانية
	فيوض الفتات النارى Pyroclastic flows	فيوض من غازات ساخنة ورماد وغبار ساخن في شكل سحابة متوهجة
	لاهار Lahar	تدفق طيني لرواسب الرماد والمواد البركانية المشبعة بالماء فوق منحدرات المخاريط البركانية

وياً أنيسياها ، وكلما زاد محتوى اللابة من الغازات ، كان انبثاقها أكثر عنفا .

- اللابات البازلتية: تنبثق اللابة البازلتية الداكنة اللون عند درجات حرارة تتراوح بين 1000°م و 1200°م وهى درجة قريبة من درجة حرارة الأجزاء العليا من الوشاح mantle. وتتميز اللابة البازلتية بأنها سائلة لدرجة كبيرة نتيجة لارتفاع درجة حرارتها ، ومحتواها المنخفض من السيليكا . وتنساب هذه اللابة على المنحدرات بسرعة ولمسافات بعيدة . وعلى الرغم من أن المتوسط الشائع لأنسياب اللابات هو عدة كيلومترات في الساعة ، إلا أنه لوحظ أن بعض اللابات تصل سرعة أنسيابها إلى نحو 100 كم في الساعة . وفي عام 1938م استطاع جيولوجيان روسيان جريثان قياس درجة حرارة الغازات البركانية وجمع عينات منها

volcanic rocks . وتضم الصخور النارية المتداخلة الرئيسية : الجرانيت (فلسى) والديوريت (متوسط) والجابرو (مافى) . وتشمل الصخور المنبثقة الرئيسية المقابلة الريوليت (فلسى) ، والانديزيت الأكثر تواجداً (متوسط) والبازلت (مافى) . ويوضح شكل (4.4) ملخصاً لهذه التصنيفات . ويمكن في هذا الإطار العام أن نتناول أنواع اللابات وكيفية أنسيابها وتصلبها .

1. أنواع اللابات

يؤدى تكوّن الأنواع المختلفة من اللابات إلى تكوّن العديد من التضاريس ، مثل الجبال البركانية التى تختلف في شكلها ، واللابات التى تصلبت وتختلف في معالمها ، وتعكس هذه الاختلافات الفرق في التركيب الكيميائى ومحتوى الغازات ودرجة حرارة اللابة . فكلما زاد محتوى السيليكا مثلاً زادت لزوجة اللابة

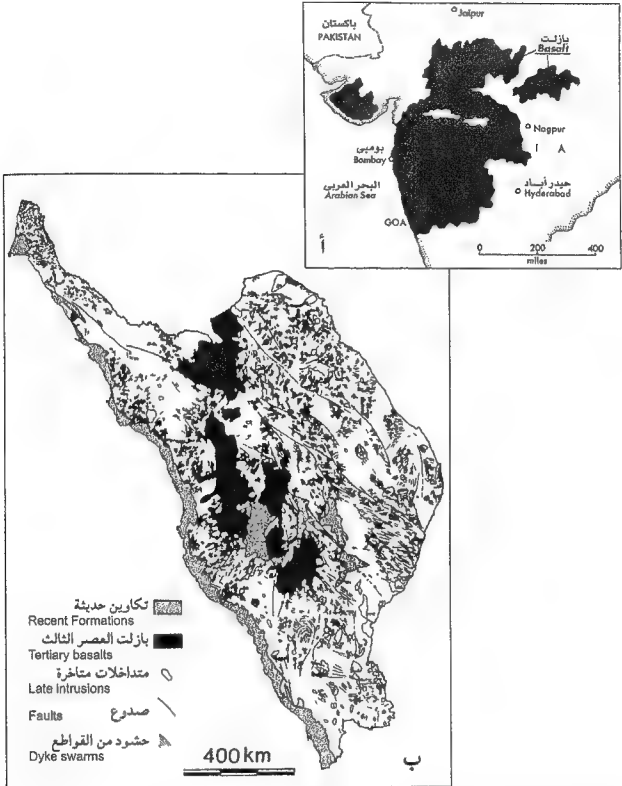
تشبه الأرض المحروثة حديثاً ، والآه آه هي لابة فقدت محتواها من الغازات وأصبحت بالتالي أكثر لزوجة عن الباهوى هوى . ولذلك فهي تتحرك ببطء ، مما يؤدي إلى تكون طبقة سطحية أكثر سمكا . وبينما تستمر اللابة في التحرك ، فإن القشرة السطحية السمكية تنكسر إلى كتل كبيرة خشنة ذات تشوهات حادة (شكل 3.5) ؛ حيث تترابط تلك الكتل فوق الجزء اللزج مما يؤدي إلى تراكم مقدمة شديدة الانحدار من الكتل الكبيرة المزواة التي تتقدم مثل جرار متحرك .

وحينما تنساب لابة بازلتية على المنحدرات فإنها تأخذ عادة شكل الباهوى هوى بالقرب من مصدر خروج اللابة ، حيث تكون اللابة مازالت سائلة وساخنة ، بينما تأخذ اللابة شكل الآه آه في المناطق الأبعد عن مصدر الصهارة على المنحدرات ، حيث يتعرض سطح اللابة المناسبة للهواء البارد لمدة طويلة وتتكون طبقة خارجية سمكية .

• لابة وسائدية: لاحظ الجيولوجيون أن اللابات الوسائدية *pillow lava* تتكون على قاع المحيط في هاواي ثم يقوم ماء البحر بتبريدها بسرعة . ويتكون التركيب الوسائدي على قاع البحر بعيداً عن مخرج اللابة البازلتية عند حيود وسط المحيط ، حيث تنخفض درجة حرارة اللابة المناسبة . ويشير مصطلح بازلت وسائدي *pillow basalt* إلى تركيب معين يتميز بوجود كتل غير متصلة من البازلت ، تكون وسائدية الشكل تشبه الأكياس ، يتراوح قطرها بين بضعة سنتيمترات ومتر أو أكثر (شكل 4.5 أ، ب) . ويتكون التركيب الوسائدي عندما تبرد الأسنة من اللابة البازلتية المنصهرة ، ويتقوى سطحها بالتبريد المفاجئ ، وتتكون قشرة خارجية خشنة ، بينما تبرد اللابة داخل هذه القشرة بمعدل أكثر بطئاً . ولذلك فإن الجزء الداخلى للوسائد يتكون من نسيج متبلور ، بينما تتكون القشرة الخارجية من نسيج زجاجي عديم البلورات

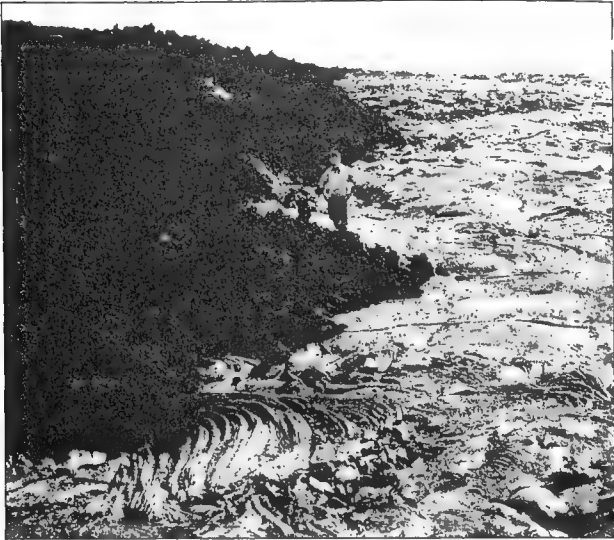
بوقوفها فوق كتلة متصلة تطفو فوق لابة من البازلت المنصهر الذي يتحرك كنهر جار . وكانت درجة الحرارة عند سطح الكتلة المتصلبة 300°م ، بينما كانت درجة حرارة نهر البازلت 870°م . وقد سجلت حالات انسابت فيها اللابة لمسافة تزيد على 50 كم من مصدر انبثاقها . وتختلف اللابات البازلتية المناسبة تبعاً للظروف التي انبثقت تحتها . ونذكر هنا بعض الأنواع المهمة لتلك اللابات البازلتية:

- بازلت فيضي : وفيه تنتشر اللابة البازلتية السائلة التي تنبثق فوق أرض مستوية على هيئة فرش رقيقة ، مثل فيضان من اللابة (شكل 2.5) . وغالباً ما تتراكم الفيوض المتشابهة في هيئة هضاب بازلتية ضخمة تسمى البازلت الفيضي *flood basalt* أو الهضاب البازلتية *basaltic plateaus* مثل تلك الموجودة في هضبة كولومبيا في أوريغون وواشنطن ، وكذلك في هضبة الدكن غرب الهند ، وتلك التي تغطي مساحات واسعة من الدرع العربي في غرب شبه الجزيرة العربية والمعروفة بالحررات (شكل 2.5).
- باهوى هوى وآه آه : تقسم اللابة البازلتية التي تبرد أثناء انسيابها على المنحدرات إلى نوعين تبعاً لشكل السطح المتكون ، وهما باهوى هوى *pahoehoe* وآه آه *aa* (شكل 3.5) .
- يتكون الباهوى هوى (الكلمة في لغة هاواي تعنى حبلية *ropy*) حينما تنتشر لابة سائلة على هيئة فرش ، ويتجمد سطحها ليكون قشرة رقيقة زجاجية مرنة تسحب وتجذب لتكون طيات ملتفة تشبه الحبل ، بينما يستمر السائل المنصهر في التدفق أسفل هذه الطبقة المرنة المتجمدة (شكل 3.5) .
- أما الآه آه *aa* فهو ما ينطق به الشخص الغافل (غير الحذر) عندما يتجراً ويمشى حافى القدمين على لابة



شكل (2.5): البازلت الفيضي:

(1) الهضبة البازلتية في غرب الهند ، (ب) الهضاب البازلتية basaltic plateaus في الشرق العربي ، والمعروفة بالحارات .
(After Genna, A. Nehlig, P., Le Coff, E., Guerrot, C., and Shanti, M., 2001: Proterozoic crustal thinning in the Arabian Shield: Geologic and metallogenic implications. Jour. Struct. Geol.)



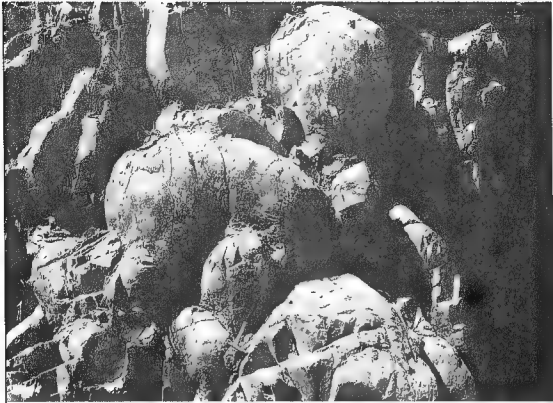
شكل (3.5) انسابات لابة من نوعى الآه aa (يسار) وباهوى هوى pahoehoe (يمين) واللسان انبثقا من بركان كيلوى Kilauea Volcano فى هاواى عام 1973م وتكون لابة الباهوى هوى طيات رقيقة ملتفة كالخيل ، بينما تكون لابة الآه كىلا غير ملساء ذات نتوءات حادة يبلغ سمكها نحو 3 إلى 4 أمتار ، وهى تغطى لابة الباهوى هوى الأكثر نمومة وتلافاً

(After Decker, R. and Decker, B., 1997: Volcanoes, 4th edition. W. H. Freeman and Company, New York)

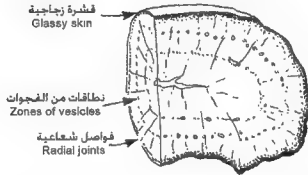
عند حيود وسط المحيط فإن درجة حرارة اللابة تكون أعلى ، وتنساب فرش رقيقة من اللابة ليتكون سطحاً زجاجياً نتيجة للتبريد المفاجئ ، وتتكدس الطفوح المنسابة لتكون تراكمات من الفرش البازلتية التى لا يزيد سمك كل فرش منها على 20 سم تقريباً .

- اللابات الريوليتية : يتميز الريوليت الفاتح اللون وكذلك اللابة الريوليتية بأنها تكون أكثر فلسية ، كما تكون درجة انصهارها أقل من اللابة البازلتية ،

بسبب تبردها بسرعة (شكل 4.5 ب). وتحدث كسورا فى هذا السطح الخارجى ، مما يؤدى إلى تكون فتحات تخرج منها الصهارة التى مازالت فى حالة سائلة وتسرّب للخارج. ثم تنقسم هذه القطعة الجديدة البارزة بالتبريد المفاجئ ويتشقق سطحها ، وهكذا تستمر العملية ويتكون فى النهاية ركام متكدس من أجسام تشبه أكياس الرمل . ومعظم اللابات التى تنساب على القشرة المحيطية تكون بازلتا وسائدا . أما بالقرب من الكسور البازلتية



٩



ب

شكل (4.5): لابة وسائدية pillow lava تكونت على قاع المحيط تحت الماء ، والتي تكون أكثر الصخور انتشارا على الأرض .
 (أ) لابة وسائدية في أوفوليت وادي غدير ، التابع للبروتيروزوي المتأخر - جنوب الصحراء الشرقية - مصر . (أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن ، هيئة المواد النورية) .
 (ب) قطاع في لابة وسائدية يظهر التركيب الداخلي للوسادة والذي يتكون من نسيج متبلور، بينما تتكون القشرة الخارجية من نسيج زجاجي غير متبلور ، تحدث به فواصل أو كسور شعاعية . لاحظ وجود نطاقات من الفجوات تكونت نتيجة لخروج الغازات .

الريوليتية بمعدل أبطأ بمقدار العشر عن اللابة البازلتية ، ولذلك فهي تقاوم الانسياب ، وتميل إلى أن تتراكم في هيئة روااسب سمكية متفخمة تشبه البصلة bulbous .

وتنبثق عند درجات حرارة تتراوح بين 800° و 1000° م . وتكون اللابة الريوليتية أكثر لزوجة من اللابة البازلتية نتيجة انخفاض درجة حرارتها ومحتواها العالي من السيليكا . وتتحرك اللابة

ج. الرواسب الفتاتية النارية

تؤثر المياه والغازات الذائبة في الصهارات كثيرا على نوع الثورة البركانية . ويؤدي الضغط الحابس *confining pressure* للصخور التي تعلو البراكين ، قبل حدوث الثورة ، إلى احتفاظ اللابات بالمواد الطيارة من الهروب . وعندما تصعد الصهارة بالقرب من السطح وينخفض الضغط ، فإنه يتم التخلص من المواد الطيارة تحت قوى انفجارية ، تهشم اللابة أو صخور أخرى صلبة تعلوها إلى كسرات ذات أحجام وأشكال وأنسجة مختلفة . وتميز الثورات الانفجارية على الأخص اللابات الريوليتية والأنديزيتية اللزجة والغنية بالغازات .

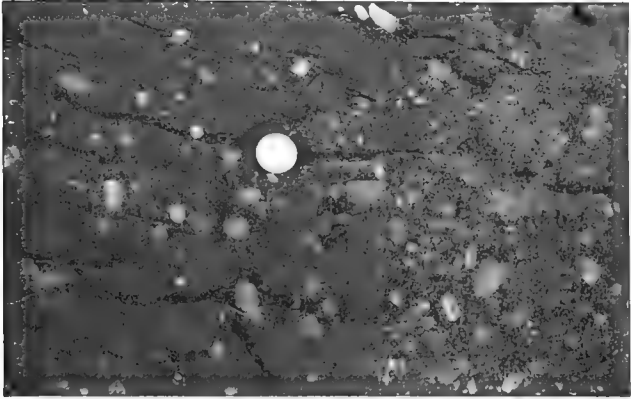
1. المقذوفات البركانية

تسمى أى مواد صخرية بركانية مفتتة تقذف في الهواء بالفتات الناري *pyroclasts* (يستمد المصطلح من الكلمات اليونانية *pyro* وتعنى نارا أو حرارة و *klastos* وتعنى مكسرا أو مفتتا) . وتسمى الصخور المتكونة من الفتات الناري بصخور فتاتية نارية *pyroclastic rocks* . كما تسمى أحيانا الرواسب المكونة من الفتات الناري بالثفرا *tephra* . ويستخدم مصطلح ثفرا كمصطلح شامل لكل الفتات الناري في الهواء ، ويشمل كسرات من الصهارة المتصلبة حديثاً سواء كانت صخوراً أو معادن أو زجاجاً ، بالإضافة إلى كسرات من الصخور القديمة المكسرة . وتشمل الثفرا الفتات الناري الذي يتساقط مباشرة على الأرض ، وذلك التي يتحرك على الأرض كجزء من فيض ساخن متحرك .

- اللابات الأنديزيتية : يتميز الأنديزيت ، والذي يحتوي على محتوى متوسط من السيليكا بين كل من اللابة الفلسية والمافية ، بصفات تقع بين تلك المعيزة لكل من البازلت والريوليت .

2. أنسجة اللابات

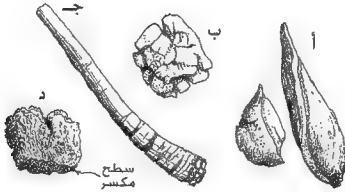
تتميز اللابات بوجود مظاهر أخرى تعكس ظروف الحرارة والضغط التي تكونت تحتها . فيمكن أن يتكون نسيج زجاجي أو دقيق التحبب إذا كان التبريد سريعا ، أو نسيج أكثر خشونة إذا كان التبريد بطيئا . ويسمى النسيج الذي يتكون من حبيبات معدنية كبيرة تعرف بالبلورات الظاهرة *phenocrysts* في أرضية *groundmass* مكونة من حبيبات صغيرة من المعادن بالنسيج البورفيرى *porphyritic texture* (شكل 5.5) . ويمكن أن يؤدي انخفاض الضغط فجأة أثناء صعود اللابة وتبريدها إلى تكون فقاعات صغيرة . وتحتوى اللابة أساسا على غازات ، كما تحتوى زجاجة المياه الغازية المخلقة على الصودا . وعندما تصعد اللابة ، يقل الضغط من فوقها ، كما ينخفض الضغط عن قطرات الصودا حينما يفتح غطاء زجاجة المياه الغازية . وكما يكون ثاني أكسيد الكربون في الصودا فقاعات نتيجة انخفاض الضغط ، فإن بخار الماء والغازات الأخرى الذائبة في اللابة تهرب منها وتكون فراغات أو كهوف صغيرة غازية أو فجوات *vesicles* تشبه الرغوة (شكل 6.5) . ويشير النسيج الرغوى *frothy texture* في اللابة المتصلبة إلى الأصل البركانى للصخر . ويمثل صخر البيومس *pumice* (الحجر الخفاف) أحد أمثلة الصخور البركانية الريوليتية التي تتميز بوجود عدد هائل من الفجوات ، لدرجة أن بعض صخور البيومس تطفو فوق سطح الماء .



شكل (5.5) ريوليت بنحير مسيح سور فيري **porphyritic texture** يتكون من حبيبات معنبة كثيرة تعرف بالبلورات الظاهرة **phenocrysts** في أرضية مكوّنة من حبيبات صغيرة من المعادن. وادي عطا الله - الصحراء الشرقية - مصر (أ.د. محمود عبد المنعم حسن، هيئة المواد النووية)



شكل (6.5) بارلت من جبل النطراي - الصحراء الغربية - مصر، به فجوات **vesicles** نتيجة خروج الغازات الدافئة في اللاه، وتترك فراغات صغيرة مكانها



شكل (7.5): الأشكال المختلفة للقذائف (القنابل) البركانية volcanic bombs. (يتراوح عرض كل القذائف بين 4.5 و 10 سم).
 (أ) قذائف تشبه اللوز almond-shaped bombs.
 (ب) قذيفة لها بنية قشرة الخبز breadcrust bomb (تكرست القشرة نتيجة تمدد اللب المنفوخ بالفجوات).
 (ج) قذيفة شريطية ribbon bomb قذيفة سكوريا لها سطح مكسر.
 (د) قذيفة سكوريا لها سطح مكسر.

ويتنوع حجم وشكل الفتات الناري بدرجة كبيرة . وتسمى الأجسام التي قذفت كقطع من اللابة وأصبحت مستديرة ، حيث تتشكل وتبرد في الهواء ، بالقذائف البركانية **bombs** (شكل 7.5) . أما الكسرات التي نشأت من صخور بركانية متصلة سابقاً ، فإنها تكون كسرات كتلية زاوية ، تعرف بالكتل **blocks** ، أما اللويبات (الحصى البركاني) **lapillis** (من الإيطالية بمعنى الأحجار الصغيرة) فتكون أصغر حجماً من القذائف البركانية والكتل . ويتراوح حجم القذائف البركانية بين حجم منزل اندفع لأكثر من 10 كم في الشورات العنيفة ، بينما يكون الرماد **ash** البركاني دقيقاً لدرجة أنه يبقى عالقاً في الهواء ويتقل لمسافات طويلة . وقد تم تتبع أثر الرماد البركاني بعد أسبوعين من انفجار في مونت بينا توبو في الفلبين في كل أنحاء العالم عن طريق الأقمار الصناعية عام 1991م . ويوضح جدول (2.5) المصطلحات المستخدمة في وصف الأحجام المختلفة للفتات الناري .

ويتساقط الفتات البركاني عاجلاً أم آجلاً ، ويكون عادة رواسب بالقرب من المصدر البركاني . كما تلتحم الكسرات الساخنة اللزجة مع بعضها بعضاً (أو تتحجر) أثناء التبريد . وتصنف الصخور المتكونة من الفتات الناري حسب حجم الحبيبات التي يتكون منها الصخر ، (جدول 2.5) . وتسمى الصخور التي تتكون من قذائف بركانية يزيد قطرها عن 64 مم بالأجلومرات **agglomerate** ، وتلك التي تتكون من كتل كبيرة بالبريشيا البركانية **volcanic breccia** . أما الصخور التي تتكون من كسرات يقل قطرها عن 64 مم فتسمى بالطف البركاني **volcanic tuff** . وتسمى الصخور التي يتراوح قطر الحبيبات فيها بين 64 مم و 2 مم بطف اللويبات **lapilli tuff** ، بينما تلك التي يقل قطر حبيباتها عن 2 مم بطف الرماد **ash tuff** .

جدول (2.5): التصنيف الحجمي للمواد الفتاتية النارية (النفا) والصخور الفتاتية النارية (After Raymond, L. A. 1995)

متوسط قطر الحبيبة (مم)	نفا (مواد فتاتية نارية غير متصلة)	الصخر الفتاتي الناري (مواد متصلة)
أكبر من 64	فتاتيف بركانية bombs - كتل blocks	أglomerate - بريشيا بركانية volcanic breccia
2 - 64	لويات (حصى بركاني) lapillis	طف اللويات lapilli tuff
أقل من 2	رماد ash	طف الرماد ash tuff

المحتوى على الغازات والكسرات البركانية المتوهجة على المنحدرات بسرعة تماثل سرعة الأعاصير ، حيث وصلت السرعة إلى 160 كم في الساعة . وخلال دقيقة واحدة غطى خليط الغازات والرماد والغبار البركاني مدينة سانت بيير وقتل 28000 شخصا . وقد قدرت درجة الحرارة عند فوهة البركان بحوالي 1200° م ، بينما كانت درجة الحرارة المتوهجة تزيد على 700° م ، وذلك عند مهاجمتها المدينة سانت بيير . وقد حدثت الوفاة لهذا العدد الضخم من البشر بسرعة ، بسبب الاصطدام بالمواد البركانية الصلبة أو لاستنشاق الغازات الساخنة جدا أو الاحتراق .

وقد أزال السحابة المتوهجة أسقف المنازل ، وهدمت معظم الحوايط التي كانت متعامدة على طريقها . كما تسببت في السواء القضبان المعدنية . وخلال دقائق معدودة تحولت مدينة سانت بيير المليئة بالمسطحات الخضراء إلى مدينة يحوطها الخراب والدمار ، وتغطي بحوالي 30 سم من الرماد البركاني ذي اللون الرمادي ، وأيضا رماد مختلط بالطين يلمح جدران المنازل وجذوع الأشجار .

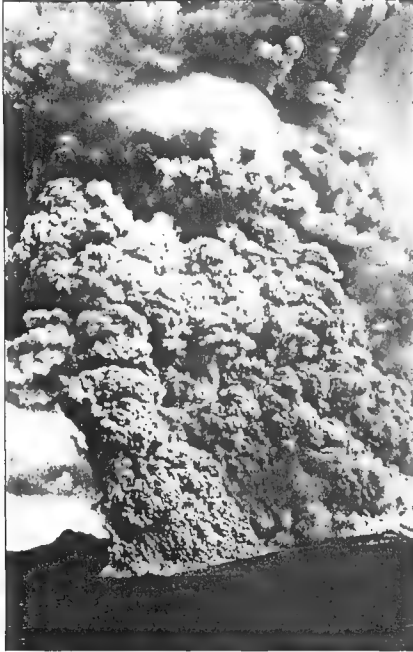
وقد صورت سحابة متوهجة من مونت بيليه بعد عدة أشهر من السحابة السابقة (شكل 8.5). كما شوهد عديد من السحابات المتوهجة الصغيرة في مايو 1980 م ، أثناء النشاط البركاني في جبل سانت هيلين بواشنطن ، حيث هبط الجانب الأيمن من الجبل إلى الغابة في أقل من ثلاث دقائق .

2. فيض الفتات الناري

قد يكون أحد أشكال الثورات البركانية DM مشيرا ومذهلا ، وغالبا ما يكون مدمرا ، حيث يقذف البركان غازات ورمادا وغبارا ساخنا في هيئة سحابة متوهجة تندفع على المنحدرات بسرعة قد تصل إلى نحو 200 كم في الساعة . وتحمل الغازات الساخنة الفتات الصلب لأعلى بعيدا عن سطح الأرض ، بحيث تجعل مقاومة الاحتكاك قليلة ، ويعرف هذا الفيض بفيض الفتات الناري pyroclastic flow .

كما يطلق أيضا على الفيض اسم السحابة المتوهجة nuée ardente (وهي كلمة فرنسية تعني عاصفة متوقدة) . وتتميز السحابة المتوهجة بطاقة تتجمع من مصادر أربعة هي الانفجار الأولى والجاذبية والغاز الهارب من قطع الصهارة المحمولة في الغازات والتي تنفجر مثلما يحدث في حبات الفشار ، وأخيرا تسخين الهواء المخلوط في السحابة المتدفقة نتيجة تحركه بعيدا أسفل المنحدرات .

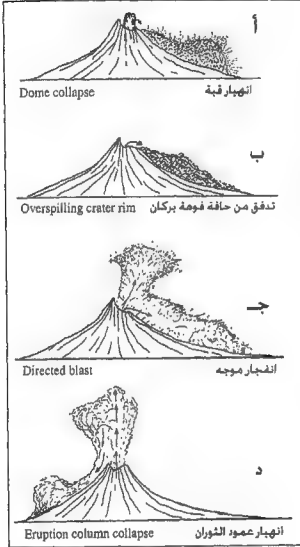
وفي صباح يوم 8 مايو عام 1902م صعدت إلى أعلى فوهة بركان في جبل مونت بيليه Mont Pelée في جزيرة مارتيك في البحر الكاريبي كتلة ضخمة من صهارة متمثلة بالغاز ودرجه لزوجتها عالية جدا . وحدثت انفجارات شديدة لها صوت يشبه صوت آلاف المدافع ، نتيجة لانفجار فقاعات الغازات المحبوسة ، مما ترتب عليه تقطع الصهارة إلى قطع صغيرة . ثم تحرك هذا الفيض من الفتات الناري



شكل (8.5) انفجار سحابة ضخمة متوهجة من مونت بيليه Monte Pelée بالبحر الكاريبي، بعد عدة أشهر من سحابة مائلة من الغازات الساخنة والرماد البركاني، والتي دمرت سانت بيير عام 1902م وتلت 28000 نسمة خلال دقائق .
(After Decker, R. and Decker, B., 1997: Volcanoes. 4th edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ويسمى الراسب رديء الفرز المتكون من الفتات الناري بإجنمبريت ignimbrite. كما يطلق أيضاً مصطلح إجنمبريت على الصخر المتكون من هذا الراسب نتيجة التحام الحبيبات الساخنة. كما يطلق أيضاً مصطلح الطف الملحوم welded tuff على الصخر المتكون من رماد ساخن جداً، وفي حالة لدنة، بحيث تنصهر الحبيبات المنفصلة مع بعضها بعضاً، وتكوّن حجرًا ناريًا غنيًا بالزجاج، حيث تلتحم

حتى وصل ارتفاعها إلى حوالي 90 متراً فوق حافة فوهة البركان، ثم حدثت عدة انهيارات لكتل ضخمة من قمة اللابة، واندفعت على المنحدرات في هيئة فيض فتات بركاني متوهج.

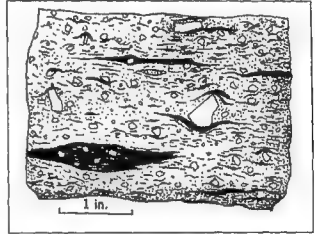


شكل (10.5): طرق تكون فيوض الفتات الناري pyroclastic flows

- (أ) انهيار قمة من اللابة، جبل أونزن عام 1991م.
- (ب) تدفق من حافة فوهة بركان، جبل مونت بيليه، 1902-1903م.
- (ج) انفجار مباشر، جبل سانت هيلين عام 1980م.
- (د) انهيار عمود الثورة column collapse، جبل ميون في الفلين عام 1968م.

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition, WCB/McGraw Hill, Boston).

الشفطاي الزجاجية تحت التأثير المشترك لكل من الحرارة الكامنة في الشفطاي وثقل المواد المساقطة، وأيضا فصل الغازات الساخنة. ويتكون هذا الصخر عادة من فتات ناري غني بالسيليكا، ويتميز بنسيج تخطيطي (شكل 9.5). وتتكون فيوض الفتات الناري بعدة طرق، (شكل 10.5)، منها:



شكل (9.5): طف ريوليت ملتحم يتميز بنسيج غطط، ويحتوي على عذمت زجاجية سوداء تلحم تحت تأثير الحرارة وثقل المواد المساقطة. وتلتصق تلك العذمت حول كسرات صخرية مزواة (جبل بير، ولاية نيفادا الأمريكية).

1- انهيار عمود الثورة: ينشأ فيض الفتات الناري عندما ينهار عمود الثورة eruption column collapse، حين تحدث ثورة وانفجار رأسى، ويقذف الرماد البركاني إلى ارتفاع قد يصل إلى 10 كم أو أكثر. وعادة ما تنهار هذه السحابة الثقيلة من الرماد والغاز وتسدق عبر منحدرات البراكين في شكل فيض فتات بركاني يتحرك بسرعة وعنف، ومثال ذلك ما حدث في جبل ميون في الفلين عام 1968 م.

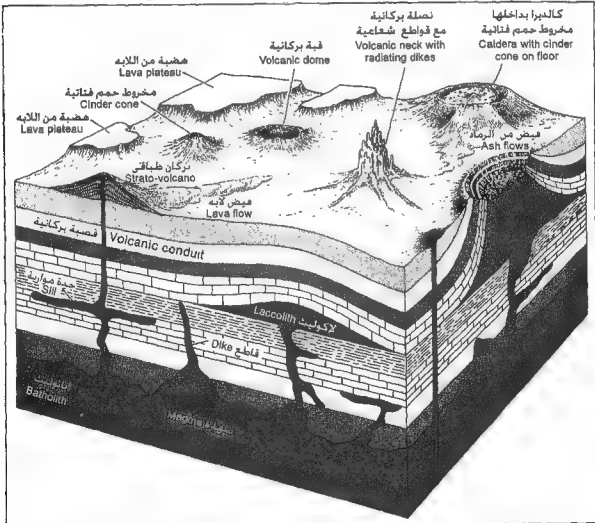
2- انهيار قمة من اللابة: قد يحدث فيض الفتات الناري بسبب انهيار قمة اللابة dome collapse، مثلما حدث في جبل أونزن باليابان عام 1991م. حيث بدأت قمة اللابة في النمو المفاجئ عام 1990 م،

3- التدفق من حافة فوهة: ويبدأ في هذه الطريقة تدفق

بعد أن استعرضنا الأنواع المختلفة للمواد البركانية التي انبثقت أو قذفت من داخل الأرض، فإننا يمكن أن نفحص عن قرب أنواع الانبثاقات والمكونات المميزة لها. ولاتكون الثورات البركانية دائماً مغروراً متنازلاً مهيباً. وتتشكل الطبقات الرئيسية والمعلمة من البازالت والتي تتكون هضبة كولومبيا في واشنطن وأوراجون، والتي تغطي مئات الآلاف من الكيلومترات المربعة، نوعاً آخر من البراكين. وتختلف المعالم البركانية في الشكل (شكل 11.5)، نتيجة اختلاف اللابة والظروف التي تمت الثورات تحتها.

3- التدفق من حافة فوهة: ويبدأ في هذه الطريقة تدفق الفتات الناري على هيئة رماد وغاز ساخن من حافة فوهة البركان بطريقة مشابهة لقدر يغلي ويتدفق محتواه على الموقة. ومثال ذلك ما حدث في جبل مونست ببلجيكا في الفترة 1902-1903م والفترة 1929-1932م.

4- الانفجار المباشر: قد يحدث فيض الفتات الناري بالانفجار المباشر، مثلما حدث في جبل مونت بيليه ببارتينيك في البحر الكاريبي عام 1902 م، حيث بدأت صهارة عالية اللزوجة جداً في ملاقوّة البركان، وقد يحدث أحياناً أن يتدفق الفتات الناري الساخن جداً من فوهة البركان، وفي بعض الأحيان الأخرى يحدث انفجار من فوهة البركان.



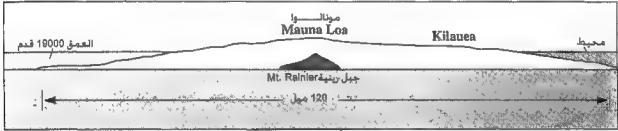
شكل (11.5): أشكال تواجدات الصخور الراكنية. كما يوضح الرسم بعض أشكال الصخور المتداخلة.

(After Schmidt, R.G. and Shaw, H.R., 1972: Atlas of Volcanic Phenomena, U.S. Geological Survey).

وعلى الرغم من أنه يرتفع أربعة كيلومترات فقط فوق مستوى سطح البحر ، إلا أنه يعتبر فعلياً أطول تركيب في العالم ، حيث يرتفع فوق قاع البحر عشرة كيلومترات ، بينما يبلغ قطر قاعدته نحو 120 كم . ولقد وصل بركان مونالوا إلى حجمه نتيجة تراكم آلاف التدفقات اللابية على امتداد عدة ملايين من السنين . حيث يبلغ سمك كل واحدة من هذه التدفقات بضعة أمتار . وتتكون جزيرة هاواي من مجموعة من البراكين الدرعية النشطة المتراكمة فوق بعضها بعضاً على مر السنين حتى برزت فوق قاع المحيط .

أ. الانبثاقات المركزية

تكوّن الانبثاقات المركزية **central eruptions** معظم أشكال البراكين الشائعة . حيث يتشكل الجبل البركاني على هيئة مخروط . وتطلق هذه الثورات اللابة أو المواد الفتاتية البركانية من مخرج مركزي **central vent** ، وهو عبارة عن فتحة في مركز المخروط البركاني تقريباً عند قمة قناة صاعدة من غرفة الصهارة ، تندفع من خلالها المواد لتنبثق على سطح الأرض (شكل 1.5 وشكل 14.5) .



شكل (12.5): بركان درعي ، مثل مونالوا Mauna Loa في هاواي ، حيث يكون قطر قاعدته أكبر من ارتفاعه . ويوضح الشكل جبل رينيه في واشنطن وهو بركان مركب composite volcano للمقارنة ، حيث يكون ارتفاعه كبيراً مقارنة بالقاعدة.

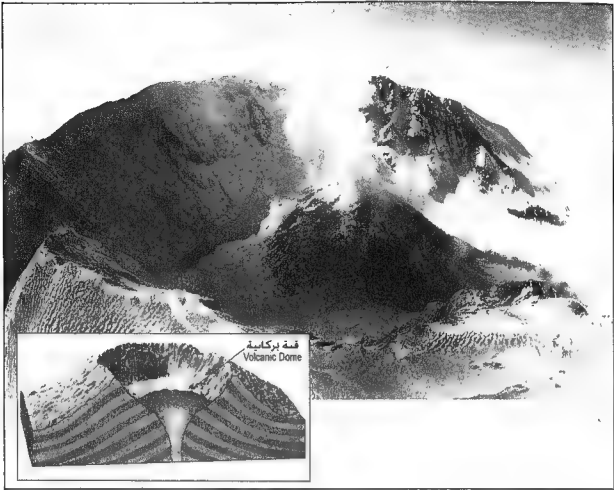
(After Tilling, R.I. et al., 1987: Eruptions of Hawaiian Volcanoes, U.S. Geological Survey).

1. البراكين الدرعية

2. القباب البركانية

تميز اللابات الفلسية (الريوليتية) ، على عكس اللابات البازلتية ، بأنها لزجة لدرجة أنها تتدفق بصعوبة بالغة . وتكون اللابة الفلسية عادة في هيئة قبة بركانية **volcanic dome** ، وهي عبارة عن كتلة مستديرة من الصخور ، ذات جوانب شديدة الانحدار . وتبدو القبة البركانية كما لو كانت تدفقت من مخرج ، مع عدم القدرة على الانتشار الجانبي . حيث تقوم القباب غالباً بغلق مخرج اللابات ، مما يؤدي إلى حبس الغازات وزيادة الضغط ، فيحدث انفجار يؤدي إلى

يتكون مخروط البركان نتيجة التدفقات المتتابعة من اللابة من مخرج مركزي . وتندفق اللابة بسهولة وتنتشر في حالة اللابة البازلتية . أما في حالة التدفقات الوفيرة والمتكررة ، فإنها تكوّن بركانا درعي الشكل يأخذ شكل القبة تقريباً ، عريض يبلغ محيطه عشرات الكيلومترات ويزيد ارتفاعه على كيلومترين ، وتكون الانحدارات لطيفة نسبياً خاصة بالقرب من القمة . ويعتبر بركان مونالوا Mauna Loa في هاواي أحد الأمثلة التقليدية لبركاني درعي **shield volcano** (شكل 12.5) .



شكل (13.5): القباب البركانية volcanic domes وهي عبارة عن كتل مستديرة من لابة ربولىنية (فلسية) تكون لدرجة أنها تتراكم فوق فوهة البركان بدلا من الانسياب على جوانبه . ويوضح الشكل هنا قبة في مرحلة نمو داخل فوهة بركان جبل سانت هيلين .
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

مستقرة . أما الكسرات الدقيقة فإنها تحمل بعيدا عن مخرج البركان ، وتكون منحدرات لطيفة عند قاعدة المخروط . ويعكس المخروط البركاني التقليدي ذو السطح المقعر ، وحيث يوجد المخرج عند القمة ، هذا التغير في الانحدار .

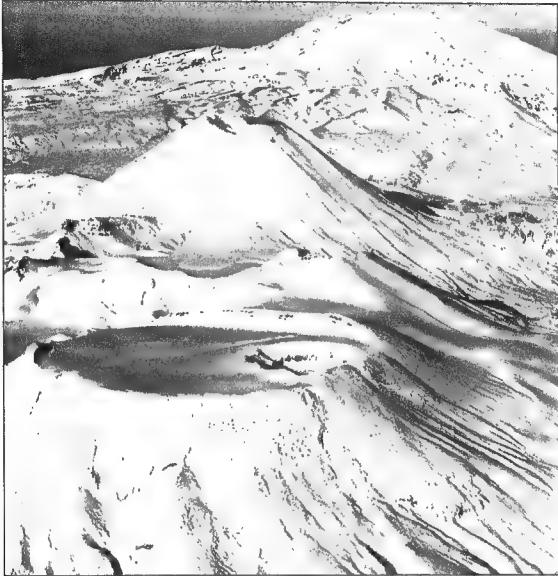
4. البراكين المركبة

تتكون البراكين المركبة composite volcanoes حينما يقذف بركان لابة مع الفئات النارى ، فتتبادل فيوض اللابة مع طبقات الفئات

تحطم القبة إلى كسرات . ومثال ذلك ، ما حدث في انفجار جبل سانت هيلين عام 1980 م (شكل 13.5) .

3. مخاريط الحمم الفتاتية

حينما تقذف المخارج البركانية فتاتا ناريا ، فإن الكسرات الصلبة تبنى مخروطا من الفئات النارى يعرف بمخروط الحمم الفتاتية cinder cone . ويتحدد بروفيلا المخروط حسب أقصى زاوية استقرار يمكن أن يبقى عندها الحطام مستقرا قبل أن ينهار على المنحدرات . وتكون الكسرات الأكبر التى تسقط بالقرب من القمة انحدارات حادة ، إلا أنها تكون



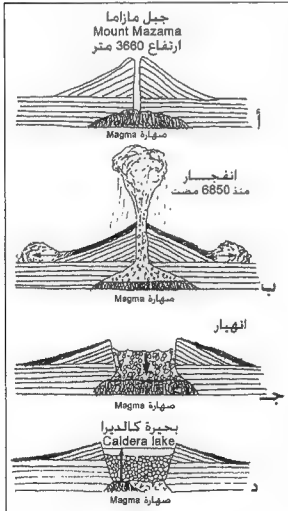
شكل (14.5): صورة جوية لبراكين تونجاريرو ونجوروهو وروبيهو Tongariro, Ngauruhoe and Ruapehu volcanoes في نيوزيلندا. وتظهر فوهة بركان تونجاريرو في مقدمة الصورة حيث يبلغ قطرها 1.3 كيلومتر، والذي يمثل حجباً وسطاً بين فوهة بركان كبيرة وكالديرا صغيرة. ويلاحظ وجود فوهة أخرى صغيرة داخل تلك الفوهة الكبيرة. ويمثل غرور بركان نجوروهو في وسط الصورة مثلاً نموذجياً لبركان طباقى stratovolcano نشط له فوهة مركزية عند قمته. ويمثل بركان روبيهو في خلفية الصورة بركاناً طباقياً آخر (After Schmidt, R.G. and Shaw, H.R., 1972: Atlas of Volcanic Phenomena. U.S. Geological Survey).

الناري لتكوّن بركاناً مركباً بمقر الشكل، أو بركاناً طباقياً stratovolcano (شكل 1.5). ويمثل هذا النوع أكثر الأنواع شيوعاً من البراكين الكبيرة، مثل: بركان فوجي ياما Fujiyama في اليابان، وبركان فيزوف Vesuvius وإتنا Etna في إيطاليا، وبركان نجوروهو في نيوزيلندا (شكل 14.5).

5. فوهات البراكين والمعالم البركانية الأخرى

فوهات البراكين: يوجد على قمة معظم البراكين، فوق مخرج البركان، حفرة على شكل منخفض دائري ذات شكل قمعى تعرف بفوهة البركان crater، تقلد من خلالها الغازات والفتات البركاني واللابة (شكل 1.5 وشكل 14.5). وتتجاوز اللابة المتدفقة

كيلومترات قليلة تحت مخرج البركان ، ثم يهبط ببطء سقف غرفة الصهارة غير المدعم تحت تأثير وزنها وينهار من خلال حلقة من الكسور الرأسية شديدة الانحدار ، تاركا منخفضا كبيرا على شكل حوض ، أكبر بكثير من فوهة البركان ، يسمى الكالديرا **caldera** (شكل 15.5). وتتميز الكالديرات بمعالها المميزة ، حيث يتراوح قطرها بين بضعة كيلومترات و 50 كم أو أكثر. ويعتقد بعض الجيولوجيين أن الكالديرا تتكون بسبب انفجار هائل في البركان ينسف قمته ، بينما أظهرت البحوث ورسم الخرائط الجيولوجية لأنشطة التصدع حول الكالديرات أن الكالديرا تحدث نتيجة انهيار سقف غرفة الصهارة ، كما ذكرنا سابقا. وقد تتراكم مياه في الكالديرا لتكون بحيرة.



جدران فوهة البركان أثناء انبثاق اللابة من البركان . وعند توقف الثورة تغوص اللابة المتبقية في فوهة البركان مرة أخرى في مخرج البركان وتتصلب . وحينئذ تحدث الثورة التالية ، تنفجر تلك المواد خارج فوهة البركان في هيئة انفجار فتاتي بركاني . وتغلق فوهة البركان بعد ذلك جزئيا بالحطام الذي يساقط داخل الفوهة . ولأن حوائط فوهة البركان تكون حادة الانحدار فإنها ربما تسقط أو يتم تعريضها مع مرور الوقت . وبهذه الطريقة ، فإن قطر فوهة البركان قد يزيد عدة مرات عن قطر مخرج البركان ، بينما تبلغ مئات الأمتار عمقا . فمثلاً يبلغ قطر فوهة جبل إتنا في صقلية حاليا نحو 300 م ، بينما تبلغ 850 مترا عمقا .

الكالديرات: تصبح غرفة الصهارة فارغة كلياً أو جزئياً ، بعد الثورة العنيفة التي تندفع فيها أحجام كبيرة من الصهارة من غرفة الصهارة المتواجدة على بعد عدة

شكل (15.5): مراحل تكون الكالديرا caldera

(أ) جبل مازاما Mount Mazama يرتفع عالياً نحو 3660 متراً .

(ب) حدث انفجار ضخم منذ 6850 سنة أدى إلى اندفاع صهارة عالية اللزوجة وفتات بركاني .

(ج) بعد توقف النشاط البركاني ، والذي اندفع خلاله حجم هائل من الصهارة بقدر ياربين كيلو متراً مكعباً ، أصبحت غرفة الصهارة فارغة كلياً أو جزئياً مما أدى إلى انهيار سقف غرفة الصهارة خلال حلقات من الكسور الرأسية شديدة الانحدار ، والتي تكون الكالديرا .

(د) تتكون بحيرة كالديرا Crater Lake عندما يملأ التجويف بالماء .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

أوضحت الأبحاث العديدة ميكانيكية تكوين الدياتريم، حيث أظهرت دراسة المعادن والصخور التي تحتويها بعض الدياتريمات أنها تتكون فقط في الأعماق الكبيرة - نحو 100 كم أو أكثر - داخل الوشاح العلوى (شكل 16.4). وتدل الدراسات أن الدياتريمات تكونت من صهر الصخور التي تقع في طريقها بالصهارات الصاعدة الغنية بالغاز، حيث تقذف في النهاية وبطاقة انفجارية أحيانا وبسرعة عالية جدا غازات وكسرات من المخرج، وكسرات من أعماق القشرة والوشاح. وربما تشبه هذه الثورات خروج العادم الفثات من صاروخ مقلوب هائل في الأرض حيث يقوم بتفجير الصخور والغازات في الجو.

وهناك دياتريم في مناجم كمبرلى الأسطورية بجنوب إفريقيا، وهى واحدة من أكبر مناجم الماس في

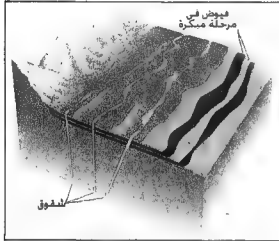
انفجارات الماء البركاني: عندما تقابل صهارة ساخنة غنية بالغاز ماء جوفيا أو ماء بحر، تتشأ كميات ضخمة من بخار الماء الشديد السخونة تصحبها الطين والمواد الأخرى، دون توهج وتسيب ما يعرف بانفجار الماء البركاني (انفجار فرياتي) **phreatic explosion**. ومن هذا النموذج انفجار بركان كراكاتوا **Krakatoa** في إندونيسيا عام 1883 م، وهو أحد أكثر الانفجارات البركانية تحطيمها وتخريباً في التاريخ.

دياتريم (ثاقبة بركانية): عندما تهرب مادة ساخنة من الأعماق الداخلية للأرض في صورة انفجار، فإن نخرج البركان والأنبوب المغذى أسفله يمتلئ بالبريشيا عندما تتضاءل الثورة. ويسمى التركيب الناشئ عن ذلك بالدياتريم أو الثاقبة البركانية **diatreme**. ولقد



شكل (16.5): جبل النهود - جنوب الصحراء الشرقية - مصر، والذي يعتقد أنه نصله بركانية **volcanic neck** أو سدادة بركانية **volcanic plug** من صخور التراكت البركانية تكونت من صهارة بردت داخل عنق البركان المركزى وبقيت بعد عمليات تجوية وتعرية البركان. (أ.د. محمود فوزى الرملى - المساحة الجيولوجية - مصر)

العالم . ويتكون هذا الدياتريم من صخر البريدوتيت ، وهو صخر فوقيافي مكوّن في معظمه من معدن الأوليفين بالإضافة إلى معدن البيروكسين . كما يحتوي أيضاً على الماس الذي يتكون من عنصر الكربون تحت ضغط كبير في الوشاح مع كسرات غثلطة من صخر الوشاح التقطتها الصهارة أثناء صعودها إلى سطح الأرض . وينظر إلى هذا الدياتريم كما لو أن بشرا قد حفر في الوشاح يصل إلى عمق 300 كم . وتعدنا الكسرات التي التقطتها الصهارة أثناء صعودها بالدليل المباشر الوحيد عن مواد الوشاح العلوى upper mantle ، والتي تتكون أساسا من صخر البريدوتيت .



النصّلات البركانية : النصّلات البركانية volcanic necks هي أحد أشكال تواجد الصخور البركانية . ويعتقد أنها تتكون من صهارة بردت داخل عنق البركان المركزي وبقيت بعد عمليات تجوية وتعرية البركان (شكل 16.5) . وتعرف النصلة البركانية أيضاً بالسدادة البركانية volcanic plug .

ب. الانبثاقات الشقية

عندما تتدفق لابة بازلتية من خلال شق في سطح الأرض يبلغ طوله عشرات الكيلومترات فإن اللابة المتدفقة تغطى مساحات شاسعة من سطح الأرض . وفي خلال الأربعة ملايين سنة الأخيرة حدث عدد لا يحصى من الانبثاقات الشقية fissure eruptions على سطح الأرض (شكل 17.5) . وتعتبر الانبثاقات التي تحدث على امتداد جيود وسط المحيط ضمن أهم الانبثاقات الشقية . وفي خلال التاريخ المسجل ، وفي عام 1783م ، شاهدت البشرية ولمرة واحدة مثل تلك الانبثاقات في آيسلندا ، والتي تعتبر جزءا مكشوفاً من جيود وسط الأطلنطى . ولقد

شكل (17.5): تنساب اللابة البازلتية منخفضة اللزوجة بسرعة أثناء الانبثاقات الشقية fissure eruption بعيداً عن الشقوق لتكون طبقات من اللابة ، تغطى مساحات شاسعة من الأرض مثل الحرات في الجزيرة العربية ، بدلاً من تكوين غرورط بركاني .
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

1. بازلت فيضى (المهضاب البازلتية)

يحتوى السجل الجيولوجى على أدلة عديدة عن فيوض بازلتية انبثقت من شقوق كبيرة . فعندما ينبثق بازلت فيضى flood basalts (ويعرف أيضاً بالمهضاب البازلتية basaltic plateaus) من شقوق طويلة ينشأ سهل أو تراكم على هيئة هضبة من اللابات ، بدلاً من التراكم على هيئة جبل بركاني كما يحدث عند الانبثاق من مخرج مركزي . فلقد غطت

اللاهار عندما يقابل فيض الفتات النارى نهرًا أو جليداً لحافه مثلجة ، أو عندما يتكسر حائط في بحيرة فوهة البركان فجأة لينطلق الماء ، أو عندما ينصهر جليد المثالج نتيجة تدفق لابة ، أو عندما يحول المطر المنهمر بغزارة رواسب جديدة من الرماد إلى تدفق طينى . ومن المعروف أن اللاهار تحمل كتل ضخمة لعشرات الكيلومترات . وعندما حدثت ثورة بركان نيفادو دول روز في جبال الأنديز ب كولومبيا عام 1985م ، تسببت رواسب اللاهار المتكونة نتيجة انصهار جليد المثالج قرب القمة في تغطية المنحدرات ودفن مدينة أرميرو على بعد 50 كم ، وقتل أكثر من 25000 شخص . وعندما حدثت ثورة بركان بيناتوبو Mount Pinatubo في الفلبين في يونيو 1991م ، تسببت رواسب اللاهار في حدوث كارثة ، كلها حل موسم المطر لمدة خمسة أعوام أو أكثر بعد حدوث الثورات البركانية (شكل 19.5).

2. الداخنات والينابيع الحارة والنفورات (الجزيرات)

لا يتوقف النشاط البركانى بتوقف انسياب اللابة أو المواد الفتاتية النارية ، ولكن قد تستمر البراكين في النشاط لعقود أو حتى لقرون . وتستمر البراكين في قذف أدخنة الغازات والأبخرة عبر مخارج صغيرة تسمى داخنات fumaroles بعد انتهاء الثوران الرئيسى . وتحتوى كل هذه الانبثاقات على مواد ذائبة تترسب على الأسطح المحيطة ، كما يتبخر الماء أو يبرد . وتتكون نتيجة ذلك أنواع عديدة من رواسب سطحية (مثل الترافرتين travertine) تغطى سطح الصخر ، وقد تحتوى على بعض المعادن النفيسة .

فيوض البازلت التى كونت هضبة كولومبيا نحو 200.000 كم² من سطح الأرض ، حيث وصل سمك بعض الفيوض المنفصلة أكثر من 100 متر ، بينما كانت بعض الفيوض الأخرى سائلة للدرجة أنها انتشرت لمسافة أكبر من 60 كم من مصدر الصحارة . ولقد تكوّن على سطح اللابة تضاريس جديدة مع وديان للأنهار جديدة غطت الأسطح القديمة . وتواجد الهضاب المكونة من الفيوض البازلتية على كل قارة (شكل 2.5).

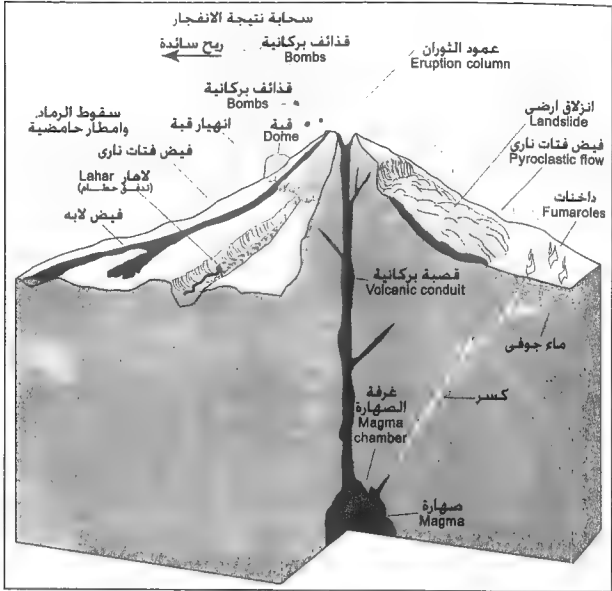
2. رواسب فيض الرماد

تكوّن المواد الفتاتية النارية المنبثقة من الشقوق الطولية أيضا فرشًا شاسعة من طف بركانى صلب تسمى رواسب فيض الرماد ash-flow deposits في الشقوق الطولية . ولم يشاهد أى من البشر أحد هذه الأحداث المهولة حتى الآن . حيث يعتقد أن رواسب فيض الرماد قد تكونت في العصر الثالث المبكر Early Tertiary في جريت بيزن Great Basin في نيفادا والولايات المجاورة بهذه الطريقة ، والتي غطت مساحة تصل إلى نحو 200000 كم² ، ويصل سمكها إلى أكثر من 2500 متر في بعض المناطق .

ج. بعض الظواهر البركانية الأخرى

1. اللاهار

يعرف التدفق الطينى لرواسب الرماد البركانى والمواد البركانية الأخرى المستقرة فوق منحدرات المخاريط البركانية المشبعة بالماء باللاهار lahar (مربة عن الإندونيسية)، وهو يعتبر من أهم العوامل البركانية الخطرة شديدة التخريب (شكل 18.5) . وقد يحدث

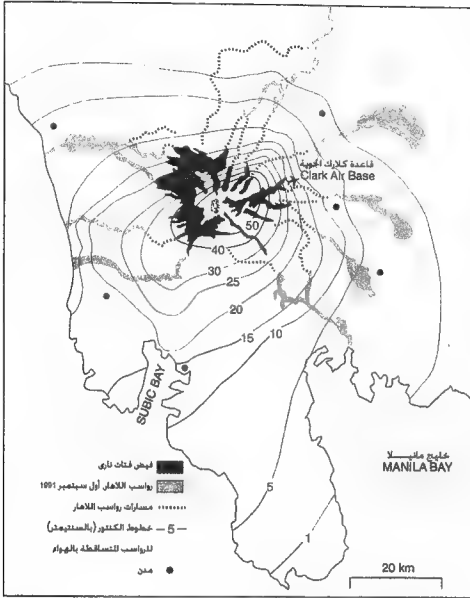


شكل (18.5) رسم تخطيطي يوضح بعض المعالم البركانية مثل فيض الفتات الناري والداخنات ، بالإضافة إلى بعض أخطار البراكين مثل اللاهار والانبيارات الأرضية (الانهار الحطام) ، حيث يمكن التوعية بتلك الأخطار ، فالإقامة في وادي بالقرب من بركان في اتجاه الرياح أكثر خطراً من الإقامة في الاتجاه المعاكس للرياح.

(After Myers, B. and Brantley, S., U.S. Geological Survey in Decker, R. and Decker, B., 1997: Volcanoes. 4th edition. W. H. Freeman and Company, New York).

من كلمة geyser المستخدمة في أيسلندا وتعني يتدفق أو ينفجر . ويعتبر جيزر أولد فيثفل Old Faithful في يلمستون بارك ، من أحسن أمثلة الفوارات في الولايات المتحدة الأمريكية ، حيث تندفع نافورة من الماء الساخن بارتفاع يصل إلى نحو 60 متراً كل 65 دقيقة تقريباً .

وعندما تقابل المياه الجوفية المتحركة في باطن الأرض صهارات مدفونة (تحتفظ بالحرارة لمئات الآلاف من السنين) فإنها تسخن وتعود إلى السطح على هيئة ينابيع حارة hot springs . والفوارات (الجيزرز) geyser هي نوع من الينابيع الحارة ينشق منها الماء الساخن والبخار بقوة وبصورة متقطعة ، وكثيراً ما يكون مصحوباً بأصوات رعدية . ويستمد اسمها



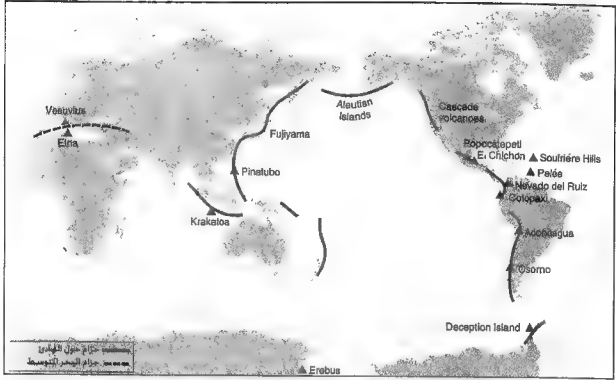
شكل (19.5): خريطة توضح الرواسب الرئيسية الناتجة عن الانفجار الضخم لجبل بينا توبو Mount Pinatubo في الفلبين، حيث اندفعت رواسب الرماد البركاني تحت تأثير الرياح في يونيو 1991 م. وقد تسببت رواسب اللاهارة في حدوث كوارث بالمنطقة كل موسم مطر هي امتداد خمس سنوات أو أكثر بعد حدوث الثورة البركانية.

(After the Pinatubo Volcano Observatory Team, EOS, December 3, 1991, in Decker, R. and Decker, B., 1997: Volcanoes. 4th edition. W. H. Freeman and Company, New York).

البحر المتوسط Mediterranean belt. أما الحزام حول الهادئ فهو الحزام الأكبر، ويضم عديدًا من البراكين في وسط أمريكا الشمالية وغرب أمريكا الجنوبية والقارة القطبية الجنوبية (أنتاركتيكا). ويشمل الجزء الغربي من حزام المحيط الهادئ براكين نيوزيلندا وأندونيسيا والفلبين واليابان، بينما يشمل الجزء الشالي

IV. التبركن وتكتونية الألواح

لاحظ الناس منذ أمد بعيد، أن كل البراكين الكبيرة في العالم تقع على امتداد حزامين رئيسيين (شكل 20.5)، وهما "الحزام حول الهادئ circum-Pacific belt أو حزام النار Ring of Fire"، والثاني هو حزام



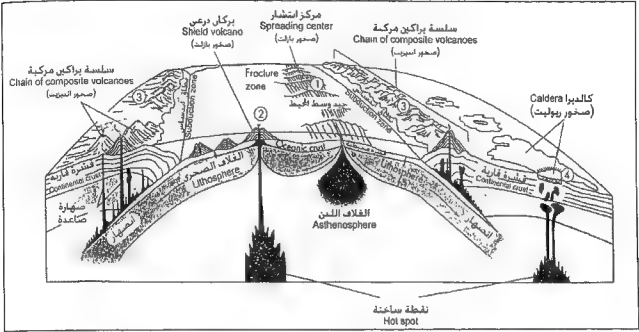
شكل (20.5): خريطة للعالم توضح الأحزمة البركانية الرئيسية.

أ - التبركن عند حدود الألواح المتباعدة (تبركن نطاق الانتشار)

كما أوضحنا سابقا في الفصلين الأول والرابع، أن قيعان المحيطات تتميز بوجود كسور تكون نظام خسف في الكرة الأرضية، تنفصل على امتدادها الألواح وينتج من خلالها البازلت. ويمتد الكسر بين اللوحين المتباعدين إلى الأعياق في الغلاف للسدن (الأمثينوسفير). وتصدد الصهارات البازلتية والمتكونة نتيجة الانصهار الجزئي للصخر فوقالمافي الساخن في غلاف الانصهار، في الفجوة بين الألواح المنفصلة، وتندفق أعلى الكسر لتكون جيود المحيط وبراكين وقشرة قاع المحيط البازلتية (شكل 21.5). وقد صبت كميات هائلة من الصهارة عبر هذا النظام من كسور القشرة الأرضية، حيث تندفقت صهارة تكفي لتغطية قشرة كل المحيطات الحالية خلال المائتي مليون سنة الماضية.

من هذا الحزام البراكين النشطة في روسيا وجزر اليوشان. أما الحزام الثاني فهو حزام البحر المتوسط ويشمل جبل فيزوف وجبل شيرا (جزيرة في البحر المتوسط) وجبل آتنا فوق جزيرة صقلية.

ويظهر توزيع البراكين النشطة في العالم، والتي يتراوح عددها بين 500 و 600 بركان أنها ليست موزعة عشوائيا، بل تتوزع تبعا لنمط محدد. فيتواجد نحو 80٪ من البراكين النشطة عند حدود الألواح المتقاربة. و 15٪ عند حدود الألواح المتباعدة، والبقية القليلة داخل الألواح. وكما أوضحنا في الفصل السابق، فإن تركيب اللابة يختلف حسب موقع البركان من تكتونية الألواح (شكل 21.5). وسناقش فيما يلي شرحا لتفسير توزيع ونشأة البراكين في إطار تكتونية الألواح:



شكل (21.5): رسم تخطيطي يوضح العلاقة بين عمليات نكتونية الألوام والنشاط البركاني ، حيث:

1. تنشأ الصخور البازلتية من الأسنيسوفير عند حدود وسط المحيط .
2. تتكون براكين درجة بازلتية بعدد عن حدود الألواح فوق الغطاء الساخنة الموجودة أسفل ألواح الغلاف الصخري .
3. تصاحب البراكين المركبة صخور بركانية أنديزيتية ونطاقات انداسوس وتنادراً صخور ريويت .
4. تحدث انبثاقات تؤدي إلى تكون كالديرات ، قد يصاحبها صخور ريويتية تتكون عندما تخلط الصهارة الصاعدة مع القشرة القارية .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: *The Dynamic Earth*, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

حيث يشد نصفها الشرقي ناحية اللوح الأوروآسيوي ، بينما يشد نصفها الغربي ناحية لوح أمريكا الشمالية (شكل 22.5) . وتتسبب قوى الشد في تكوين كسور تتدفق عبرها الصهارة إلى السطح. ويتكون في نهاية كل مرحلة نتيجة لتصلب اللابة قاطع dike رأسى وطبقات أفقية تقريبا على الأسطح الجانبية للكسور. ومع كل مرحلة جديدة من الانتشار الجانبي، يتكون كسر جديد ويحدث تدفق جديد خلال القاطع القديم. وهكذا تنمو أيسلندة نتيجة الانبثاقات المتكررة من الكسور الطولية، وأيضا من مخارج عميقة. وعلى الرغم من اختلاف هذا السيناريو عما يدور تحت الماء، فإن أقوى الاحتمالات تشير إلى أن قشرة قيعان المحيطات تتكون بالطريقة نفسها .

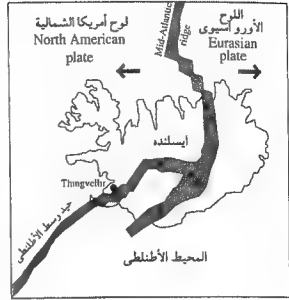
وتنخفض حرارة البراكين كثيراً عند قيعان المحيطات حينما تتحرك المياه الباردة في كسور جيود وسط المحيط . ويكون ماء البحر الذي ارتفعت درجة حرارته وأصبح غنياً بالمعادن الذائبة نتيجة تلامسه مع الصهارة يتابع ساخنة جداً (350°C) ومخارج للدخان بامتداد هذه الكسور . وتعتبر هذه الأماكن مصدراً مهماً للمعادن بما فيها خامات الزنك والنحاس والحديد (شكل 12.19).

وتمدنا أيسلندة ، والتي تعتبر واحدة من المناطق القليلة المكشوفة لجيود وسط الأطلنطي، بنموذج لمشاهدة عملية انبثاق الصهارة عبر كسور قيعان المحيطات مباشرة . وتتكون جزيرة أيسلندة في معظمها من البازلت ، كما تتميز بأنها في حالة شد عند طر فيها ،

وقد يتسبب الماء الموجود في رواسب الطبقة الخارجية لقيعان المحيطات فوق اللوح المندس في انصهار الوشاح الساخن فوقه ، حيث يعمل هذا الماء على خفض درجة حرارة انصهار الصخر (الفصل الرابع). وتتكون في هذه العملية صهارات بازلتية تغذى براكين نطاق التقارب . وتتكون بالإضافة إلى الصهارات البازلتية التي تنشأ من الانصهار الجزئي للوشاح صهارات متوسطة وأخرى أكثر فلسية ، إذا توافرت مصادر لتزويد الصهير بالسيليكا والعناصر الأخرى. وترتفع درجة حرارة اللوح المندس البارد في نطاقات الاندساس نتيجة الغوص في الوشاح الساخن، حيث تنشأ مواد نتيجة انصهار رواسب قاع المحيط والقشرة المحيطية أعلى اللوح المحيطي المندس . وبالإضافة لذلك ، تتداخل الصهارات الصاعدة من الوشاح في القشرة الفلسية للوح القاري العلوي وتسبب انصهاره جزئياً. وتنشأ عن هذه العملية أنواع من الصهارات الأكثر فلسية ، والتي تغذى البراكين عند حافة اللوح القاري العلوي. وهكذا يمكن التنبؤ بالنشاط البركاني المصاحب لعملية الاندساس ونشأة صهارات مختلفة الأنواع ، في إطار نظرية تكتونية الألواح.

1- التبركن في التقارب المحيطي - المحيطي

عندما يتقارب لوحان محيطيان ، ينشأ من قاع محيط اللوح العلوي قوس من الجزر البركانية تعرف بأقواس الجزر island arcs ، نتيجة انبثاق البازلت أو الأنديزيت أحياناً ، أو الريوليت نادراً . وربما ينشأ البازلت من الغلاف اللدن (الأمثيونسفير) أعلى اللوح المحيطي (المندس) . ويتواجد الأنديزيت (الأكثر سيليكية) عندما تصاف عناصر مستمدة من الانصهار الجزئي للقشرة البازلتية عند درجات انصهار مختلفة ، بالإضافة إلى رواسب قاع المحيط المصاحبة للوح



شكل (22.5): تقع جزيرة آيسلندا فوق نقطة ساخنة تقع على حيد وسط المحيط الأطلسي ، حيث يشد نصف الجزيرة الشرقي ناحية اللوح الأوروآسيوي ، بينما يشد نصفها الغربي ناحية لوح أمريكا الشمالية .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

ب - التبركن عند الحدود المتقاربة (تبركن نطاق التقارب)

يتم في الوقت الحالي دراسة وفحص العديد من الظواهر التي تحدث عندما تقارب الألواح ويحدث الاندساس subduction . ومن المظاهر المميزة لذلك سلسلة البراكين التي توازي الحدود المتقاربة ، أيما كان نوع تلك الحدود ، سواء كان محيطياً- محيطياً ، أو محيطياً-قارياً (شكل 21.5) . وتختلف أنواع الصهارات التي تغذى البراكين في نطاق التقارب عن الصهارة البازلتية المتكونة في حيد وسط المحيط . وتراوح تلك الصهارة في تركيبها من مافية إلى متوسطة إلى فلسية ؛ أي من بازلتية إلى أنديزيتية إلى ريوليتية . وتقدم فكرة الاندساس عدة تفسيرات للميكانيكية التي تؤدي إلى تكوّن أنواع مختلفة من الصهارات في نطاق الاندساس.

السلسلة بأنه لا تصاحبها زلازل كبيرة متكررة، ولذلك فإنها تسمى حيداً لازلزالياً **aseismic ridge**. وقد كان من الصعب تفسير نشأة الحيدو اللازالية ذات الأصل البركاني، والتي تتواجد أيضاً في كل مكان في المحيط الهادئ وفي المحيطات الأخرى الكبيرة، في إطار نظرية تكتونية الألواح، حتى تم التوصل إلى فكرة النقاط الساخنة **hot spots**. وقد عرض اقتراح النقاط الساخنة لشرح أشكال البراكين داخل القارات بعيداً عن حدود الألواح. ويعتبر بركان يلوستون ببارك Yellowstone Park مثالاً لنقطة ساخنة قارية نشطة فوق لوح أمريكا الشمالية. فطبقاً لهذه الفرضية والموضحة في (شكل 21.5)، فإن النقاط الساخنة تمثل تعبيراً عن البلومات على سطح الأرض. والبلوم **plume** هو عبارة عن مادة صلبة ساخنة تصعد من الأعماق خلال الوشاح (وربما حتى الحد الذي يفصل بين اللب والوشاح). وعندما يصل البلوم إلى الأعماق الضحلة، حيث ينخفض الضغط فإنه يبدأ في الانصهار. وتحترق الصهارة الغلاف الصخري (الليثوسفير) لتنبثق عند السطح. ويعتقد أن هذه التيارات العمودية ثابتة في الوشاح، ولا تتحرك مع حركة ألواح الغلاف الصخري. وعند مرور اللوح فوق البلوم، فإن النقطة الساخنة تترك سلسلة من البراكين النشطة والتي تتحول إلى براكين خامدة تزداد في العمر كلما ابتعدنا عن النقطة الساخنة. ويوضح توزيع البراكين الخاملة، والتي تكون جزر هاواي وسلسلة جبال الإمبرور سيمونت Emperor seamount (شكل 23.5) آثار حركة لوح المحيط الهادئ فوق نقطة ساخنة يميزها البراكين النشطة في هاواي، بينما يسجل الانحناء في السلسلة تغيراً في اتجاه حركة اللوح.

الهابط. وتمثل أقواس جزر الأليوشن ومايانا نموذجاً أولياً **prototype** لهذه العملية.

2- التبركن في التقارب المحيطي - القاري

عندما يندس لوح محيطي تحت لوح يحمل قارة فوق حافته المتقدمة، فإنه تنشأ سلسلة جبال بركانية قوسية تعرف بالأقواس البركانية **volcanic arcs** في نطاق التصادم بالقرب من الحافة القارية (شكل 21.5). وتمثل جبال الأنديز حدود التقارب بين لوحى أمريكا الجنوبية (حافة قارية) ونازكا (حافة محيطية). ويؤدى اندساس لوح جوان دى فوكا الصغير (حافة محيطية) تحت لوح أمريكا الشمالية (حافة قارية) إلى تكوّن براكين سلسلة الكاسكيد Cascade Range، والتي تمتد من كاليفورنيا الشمالية إلى كولومبيا البريطانية، حيث تتضمن هذه السلسلة بركان سانت هيلين. وعند حدوث ثورة بركانية، تقذف كميات من الرماد واللابة الأنديزيتية، وبعض اللابة الريوليتية. وغالباً ما يكون المصدر خليطاً من صهارة بازلتية تصعد من الوشاح مختلطة بقشرة قارية فلسية أعيد صهرها أثناء صعود الصهارة البازلتية في تلك القشرة. وبالإضافة إلى ما سبق، يمكن أن تضاف مواد منصهرة من اللوح المندس إلى الخليط.

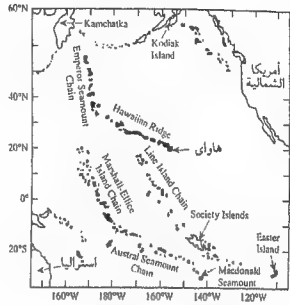
ج- التبركن داخل الألواح

يمثل التبركن بعيداً عن حدود الألواح مشكلة لنظرية تكتونية الألواح، حيث يبدو أنه استثناء من المقارنة الدقيقة بين التبركن وحدود الألواح. فلو أخذنا مثلاً من جزر هاواي التي تقع وسط لوح المحيط الهادئ، فإن سلسلة الجزر تبدأ من البراكين النشطة في هاواي، وتستمر مثل سلسلة من حيدو وجبال بركانية خامدة مغمورة تم تعريتها، وتزداد في العمر كلما ابتعدنا عن جزر هاواي. وتتميز تلك

ويمكن ملاحظة وجود الانبثاقات الشقية التي تميز المراحل الأولى للخصف القارى وبداية تكوّن محيط جديد في أماكن عديدة من العالم . فمثلاً قد يوجد البازلت في وديان الخصف في شرق إفريقيا . حيث يعتقد أنه يمثل أحد مظاهر انشطار هذا الجزء من إفريقيا والذي لم يكتمل بعد .

٧. البراكين والمناخ

تلقى العلاقة بين الثورات البركانية والتغيرات في الطقس weather والمناخ climate المزيد من الاهتمام منذ فترة طويلة . فعندما ثار بركان لاكى Laki volcano في آيسلندا عام 1783 م انبثقت منه أكبر لاية في التاريخ ، وخرجت كمية ضخمة من الغازات التي غطت جزيرة آيسلندا ومعظم شمال أوروبا لعدة شهور في صورة غيوم haze وضباب أزرق . وقد احتوت الغازات على كمية من غاز الفلورين مما أدى إلى موت كثير من الدواب في آيسلندا ، وحدث مجاعة قاسية أدت إلى هلاك نحو خمس سكان الجزيرة . ومع مرور الوقت وصل الغيام الرقيق إلى أوروبا ، حيث أمكن رؤيته لأيام عديدة في الصيف . وقد كان شتاء 1783-1784 م قاسياً خاصة في أوروبا . وقد أوضحت المشاهدات الحقلية أن الرماد الدقيق والغازات التي انبثقت من بركان لاكى قد حجبت أشعة الشمس بدرجة أدت إلى وجود طقس بارد . وقد كان البريطاني لامب Lamb إخصائي علم المناخ هو صاحب اقتراح أن النشاط البركاني يؤثر على المناخ . وقام لامب بجمع قائمة تفصيلية بالثورانات البركانية منذ عام 1500 قبل الميلاد ، وعمل حساباً لمعامل يعتمد على الكمية الظاهرة من الحطام البركاني المنتشر في الغلاف الجوي . وقد توصل إلى أن هناك علاقة واضحة بين التغيرات المناخية في العالم والثورات البركانية الكبيرة .



شكل (23.5): خريطة توضح سلسلة البراكين الممتدة بنظام خطى ، والتي نشأت من حركة لوح المحيط الهادئ فوق نقطة ساخنة . ويعكس الانحناء في سلسلة البراكين تغير اتجاه حركة اللوح .

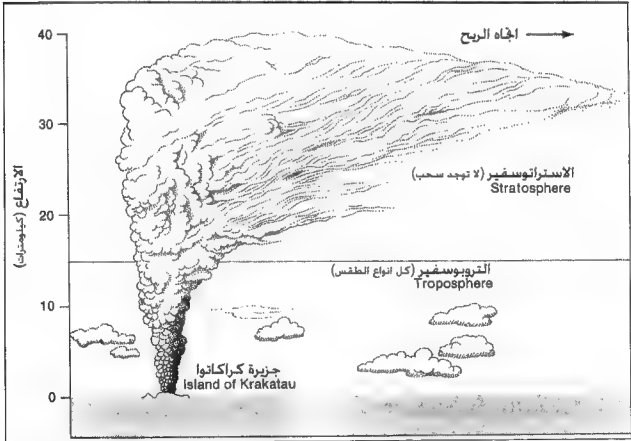
على أن أصل الانبثاقات الشقية للبازلت فوق القارات مازالت محل نقاش حتى الآن . ومن تلك الانبثاقات تلك التي كونت هضبة نهر كولومبيا وهضاب الالة الأكبر في البرازيل وبارجواي والهند وسيريرا . وقد اقترح البعض وجود بلومات ضخمة تعرف بالسوبريلوم superplume ، تصعد من الأعماق عبر اللشاح كمصدر للانبثاقات الشقية ، التي تكوّن هضاب الالة الكبيرة القارية ، حيث يزيد حجم بعضها على مليون كيلومتر مكعب . ويقترح البعض الآخر أن كسورا (لم يحدد أصلها) اخترقت الغلاف الصخري القارى ، وأن اللابات البازلتية ، والتي تمثل الانصهار الجزئى للوشاح أسفله قد اندفعت بسرعة إلى السطح بدون تشوب contamination (تغير التركيب الكيميائى للصهارة) من القشرة الفلسية . وقد كان التبركن الذى غطى معظم سيريرا بالالة منذ نحو 250 مليون سنة عند نهاية العصر البرمى ذا أهمية خاصة ، حيث يعتقد أنه كان السبب في أكبر هلاك للأحياء في التاريخ الجيولوجى .

البحر أو الأعاصير الترابية أو الشورات البركانية أو حرائق الغابات أو الملوثات الصناعية . وتتغير كثافة طبقة الرذاذ خلال شهور أو سنوات ، إلا أنها قد تتغير فجأة نتيجة ثورة بركانية، كما تحتاج لسنوات حتى تعود إلى وضعها الطبيعي . وتسقط أشعة الشمس على هذه الطبقة من الغيوم في الاستراتوسفير ، مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الاستراتوسفير وبرودة الغلاف الجوي أسفله ، وكذلك سطح الأرض .

VI. تقليل مخاطر كوارث البراكين

يهدد واحد من كل ستة براكين نشطة في العالم حياة البشر . ويتراوح عدد تلك البراكين بين 500 و 600

وإذا كان الرماد والغازات تؤثر على الطقس والمناخ، فلا بد أن التأثير يكون في الاستراتوسفير stratosphere (الجزء العلوي من الغلاف الجوي ويقع بين 10 و 50 كم فوق سطح الأرض) حيث تحوم طبقة من الغازات لفترة طويلة ، مع عدم وجود سحب أو أمطار تغسل تلك الملوثات بسرعة (شكل 24.5) . وقد قام إخصائيو علم المناخ بتحديد طبقة من الرذاذ تبقى لمدة طويلة عند ارتفاعات تتراوح بين 15 و 30 كم ، والتي يبدو أنها تتكون من غيوم رقيق يتكون من رماد سيليكاتي وملح من البحر ونقيطات droplets من حمض الكبريتيك تقلل من شفافية الجو ، وربما تنشأ تلك المكونات من مصادر عديدة ، مثل رذاذ



شكل (24.5): السحابة التي اندفعت عاليا في طبقة الاستراتوسفير من بركان كراكاتاو Krakatau volcano عام 1883م ، حيث لا توجد سحب مطرة يمكنها أن تعيد الهطام البركاني إلى سطح الأرض ، ويبقى الرماد البركاني معلقا في طبقة الاستراتوسفير لعدة شهور أو سنوات . (After Hazlett, R., 1978 in Decker, R. and Decker, B., 1997: Volcanoes. 4th edition. W. H. Freeman and Company, New York).

لتقليل الكوارث . وتستطيع أجهزة الملاحظة والرصد أن تسجل إشارات الزلازل أو تغير درجة حرارة الأرض أو تحرك الصهارة ، مما يؤدي إلى انتفاخ البركان وانبثاق الغاز ، أو تغيرات الحرارة عند مخارج البخار والينابيع الحارة على البراكين ، والتي تحذر من ثورة على وشك الحدوث . كما يمكن إخلاء البشر الموجودين في نطاق الخطر تحت إشراف السلطات المختصة . وجدير بالذكر ، أنه لا يمكن منع الثورات البركانية ، إلا أنه يمكن تقليل مخاطرها بدرجة معقولة ، بتضافر جهود العلماء ووضع برامج تثقيفية للناس .

وكما أسلفنا ، فإن الثورات البركانية لا يمكن التحكم فيها ، إلا أنه في بعض الحالات الخاصة ، يمكن تقليل الأضرار الناجمة عنها على نطاق محدود . وربما كان من أنجح المحاولات للتحكم في النشاط البركاني ما حدث في آيسلندة في يناير 1973 م ، حيث تم رش اللابة المتقدمة في البحر . وقام المواطنون بتبريد اللابة وبالتالي تقليل انسيابها ، كما منعوها من سد مدخل الميناء وحافظوا على بعض المنازل من الدمار .

وبالنسبة للمستقبل ، فإن أفضل سياسة لحماية الأحياء من خطر البراكين ، هو إنشاء أنظمة للتحذير والإخلاء أكثر تقدماً ، وحظر إنشاء مجتمعات عمرانية في الأماكن الخطرة بصورة أكثر صرامة . إلا أن هذه التدابير الوقائية قد لا تفيد كثيراً ، عندما ينشط فجأة بركان ساكن أو خامد لفترة طويلة ، مثل بركان فيزوف وسانت هيلين .

VII. الاستفادة من البراكين

لقد رأينا بعضاً من المناظر الطبيعية الجميلة لجبال البراكين وأيضاً بعضاً من آثارها التدميرية . كما تقدم البراكين أيضاً بعض الفوائد لرفاهية الإنسانية . فكما ذكرنا في الفصل الأول فإن نشأة الغلاف الجوي

بركان . كما أنها تدمر الممتلكات عندما تنهار الجباني الضخمة وتحدث الانفجارات العنيفة ويتساقط الرماد وتنتقل الغازات المهلكة والملوثة للغلاف الجوي وتنساب اللابة واللاهار . ويوضح شكل (18.5) بعض الكوارث التي تحدثها البراكين .

وقد تمكن العلماء الذين يراقبون جبل سانت هيلين وجبل بيناتوبو Pinatubo من التنبؤ والتحذير وإصدار تعليمات الإخلاء من ثورات رئيسية هائلة . وفي حالة بركان بيناتوبو ، والذي لم يثر لمدة 500 عام ، فقد صدر التحذير قبل الثورة العنيفة بعدة أيام . ومن ثم تم إخلاء نحو ستين ألف شخص من منطقة يبلغ قطرها 10 كم من قمة البركان . وقد تم إنقاذ عشرات الآلاف من الأحياء من اللاهار الذي دمر كل شيء في طريقه . وبذلك أمكن تجنب الكارثة ونجا الكثير من البشر عدا القليل منهم الذين تجاهلوا التحذيرات .

وعلى عكس قصص هذه النجاحات ، فهناك إخفاقات منها مأساة بركان نيفادو ديل روز Nevado del Ruiz volcano في كولومبيا عام 1985 م . فرغم تحذير العلماء من خطورة هذا البركان ، حيث توجد قمة جليدية على قمة الجبل العالية ، وأن أي انسياب للابة أو لكسرات صخرية ساخنة فوق الجليد ستسبب كارثة . وقد استعد العلماء بإصدار التحذير ، إلا أنه لم تكن هناك إجراءات جادة للإخلاء . ونتيجة لذلك ، فلقد هلك خمسون ألفاً من البشر بسبب اللاهات التي انطلقت نتيجة الثورة المحدودة .

وقد تطور علم البراكين إلى الدرجة التي يمكننا بها تحديد مواقع البراكين الخطيرة في العالم وتحديد المخاطر الممكنة ، من نوع المواد التي تخرج من البركان أثناء الثورات في مراحلها الأولى . ويمكن استخدام تقيييمات المخاطر لإصدار التعليمات بخصوص عمل نطاقات لتقييد استخدام الأرض - وهو أكثر مقياس مؤثر

3. عندما ينبثق البازلت على السبيلة على القارات فإنه ينبثق من شقوق طولية وينساب في هيئة فرش رقيقة تكون هضبة من اللابة . ويتكون البركان الدرعى من الانبثاقات المتكررة للبازلت من مخرج بركان مركزى .

4. تكون الصهارة السيليكية (الريوليتية) أكثر لزوجة ، وعندما تكون محملة بالغاز فإنها تميل إلى التدفق بعنف ، ويتراكم الحطام النارى الناتج من مخروط من حمم فتاتية أو يغطي منطقة شاسعة برواسب فيض الرماد . ويتكون البركان الطباقى (المركب) من طبقات متبادلة من فيوض اللابة وراسب فتات نارى.

5. يؤدي الانبثاق السريع للصهارة من غرفة الصهارة المتواجدة على بعد بضعة كيلومترات تحت السطح إلى انهيار سقف غرفة الصهارة وتكون منخفض كبير على السطح يطلق عليه كالدبرا.

6. علاقة التركز وتكونية الألواح: تتكون القشرة المحيطية من صهارة بازلتية تصعد من الغلاف اللدن (الاستينوسفير) من خلال كسور حيود وسط المحيط (أنظمة الخسف) حيث تتباعد الألواح. وتميل اللابات البازلتية (مافية) ، والأنديزيتية (متوسطة) والريوليتية (فلسية) إلى الانبثاق في نطاقات التقارب . ويتكون البازلت من الانصهار الجزئى للوشاح أعلى اللوح المندس ، حيث يساعد في ذلك الانصهار الماء الذى ينساب من رواسب قاع المحيط المندسة . وعند تقارب لوحين محيطيين ، تتكون جزر بركانية بازلتية . أما الأنديزيت والريوليت فإنها تنتشر في الأحزمة البركانية عند حدود الألواح المتقاربة بين لوحين أحدهما محيطى والآخر قارى . وتعمل إضافة السيليكا وعناصر

والمحيطات ربما ترجع إلى النشاط البركانى فى الماضى البعيد عند نشأة الأرض . وتتميز التربة المتكونة من المواد البركانية بأنها عالية الخصوبة بسبب وجود بعض المعادن التى تحتوىها . وتعتبر الصخور البركانية والغازات والبخار أيضا مصادر للمواد الصناعية والكيماويات ، مثل اليومس (الحجر الخفاف) وحمض البوريك والأمونيا والكبريت وثانى أكسيد الكربون وبعض الفلزات . كما أن تحرك ماء المحيطات ودورته فى شقوق حيود وسط المحيط عامل مهم فى تكوين بعض الخامات المعدنية .

وتستخدم الطاقة الحرارية للبراكين فى أماكن عديدة فى العالم ، كما يتزايد استخدامها بمرور الوقت . فمعظم المنازل فى بعض مناطق أيسلندة يتم تدفئتها بمياه ساخنة مستمدة من الينابيع الحارة . كما يستغل البخار الساخن والناشئ من ماء ارتفعت درجة حرارته نتيجة ملامسته لصخور بركانية ساخنة تحت سطح الأرض كمصدر للطاقة لإنتاج الكهرباء فى إيطاليا ونيوزيلندة والولايات المتحدة الأمريكية والمكسيك واليابان والاتحاد السوفيتى السابق .

الملخص

1. تحدث البراكين حينما تصعد صخور منصهرة إلى السطح ، حيث إنها أقل كثافة من الصخور المحيطة . كما أن المصهور يعصر ويدفع إلى أعلى تحت تأثير وزن الصخور التى تعلوه .

2. تصنف اللابات إلى فلسية (ريوليت) ، أو متوسطة (أنديزيت) ، أو مافية (بازلت) بناء على تناقص كميات السيليكا وزيادة كميات الماغنسيوم والحديد التى تحتوىها . ويعتبر التركيب الكيمىائى للابة ودرجة لزوجتها ، بالإضافة إلى ما تحتوى عن غاز ، عوامل مهمة فى شكل الثورة التى تحدث .

المدفونة أو يدور ماء البحر خلال أخاديد قاع المحيط.

8. هناك علاقة واضحة بين التغيرات المناخية في العالم والثورات البركانية الكبيرة ، حيث يساهم الرماد والغازات المنطلقة من البراكين في تكوّن طبقة غيام في الأستراتوسفير . وعندما تسقط أشعة الشمس على هذه الطبقة ، ترتفع درجة حرارة الأستراتوسفير ويبرد الغلاف الجوى أسفله وكذلك سطح الأرض .

9. يمكن تقليل الأضرار الناجمة عن الثورات البركانية على نطاق محدود ، بإنشاء أنظمة تحذير وإخلاء متقدمة وحظر إنشاء مجتمعات عمرانية في الأماكن الخطرة القريبة من البراكين النشطة .

أخرى مستمدة من إعادة صهر القشرة القارية الفلسية أو من صهر رواسب قيعان المحيطات والقشرة أعلى اللوح الهابط ، إلى الصهارة البازلتية ، إلى تكوين الأنديزيت والريوليت . ويحدث التبركن داخل الألواح فوق النقاط الساخنة والتي تمثل تعبيرا على سطح الأرض للبلومات ، وهى مواد ساخنة تصعد من الأعماق في الوشاح.

7. ربما ترجع نشأة الغلاف الجوى والمحيطات إلى التبركن أثناء تطور الأرض. والطاقة الحرارية في مناطق التبركن الحديثة لها أهمية كبيرة كمصدر للطاقة. وبالإضافة إلى ما سبق، فإن الخامات تتكون عندما تتحرك المياه الجوفية وتدور حول الصهارات

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

<http://volcano.und.edu/>
<http://www.geo.mtu.edu/volcanoes/>
<http://www.speist.hawaii.edu/GG/hcv.html>
<http://www.speist.hawaii.edu/GG/hcv.html>
<http://vulcan.fis.uniroma3.it/>
<http://www.dartmouth.edu/~volcano/>

المصطلحات المهمة

a a	آه آه	lava	اللاية
agglomerates	أجلومرات	pahoehoe	باهوى هوى
aseismic ridge	حيد لازلزلى	phreatic explosion	انفجار الماء البركانى (انفجار فوياتى)
ash fall	رماد متساقط	pillow lava	لاية وسائدية
ash-flow deposits	رواسب فيض الرماد	plume	بلوم
ash	رماد	porphyritic texture	نسيج بورفيرى
basaltic plateaus	هضاب بازلتية	pyroclastic flow	فيض الفتات النارى
block	كتلة	pyroclastic rocks	صخور نارية فتاتية
bomb	قذيفة بركانية	pyroclasts	فتات نارى
caldera	كالديرا	shield volcano	بركان درعى
central eruption	انبثاق مركزى	spring	ينبوع
central vent	عنق (غرج) مركزى	stratovolcano	بركان طباقى
cinder cone	خروط حمم فتاتية	tephra	تفرا
composite volcano	بركان مركب	tuff	طف
crater	فوهة (بركان)	vesicle	فجوة (ج. فجوات)
diatreme	دياتريم (ثاقبة بركانية)	volcanic breccia	بريشيا بركانية
fissure eruption	انبثاق شقى	volcanic conduit	قصبه بركانية
flood basalt	بازلت فيضى	volcanic dome	قبة بركانية
fumarole	داخنة	volcanic ejecta	مقلوفات بركانية
geyser	فواره (جيزر)	volcanic neck	نصلة بركانية
hot spot	نقطة ساخنة	volcanic tuff	طف بركانى
hot springs	ينابيع حارة	volcanism	تبركن
ignimbrite	إجنمبريت	volcano	بركان
lahar	لاهار (انجبار طين بركانى)	welded tuff	طف ملحم
lapilli	لوبيات (حصى بركانى)		

الأسئلة

1. اشرح لماذا يعتبر الغلاف اللدن (الاستينوسفر) مصدراً رئيسياً للصحارة؟ وما الذى يدفع الصحارة لتتصعد إلى سطح الأرض؟
2. ما الفرق بين الصحارة واللابة؟ اذكر أمثلة لأنواع الصخور البركانية ومقابلاتها من الصخور المتداخلة خشنة التجب.
3. اذكر الأنواع الرئيسية للانبثاقات البركانية والرواسب، والمعالم التى يكونها كل نوع.
4. ما العلاقة بين حدود الألواح والتبركن؟ هل يمكن مقارنة نوع الانبثاق وتركيب الصخور البركانية مع حدود الألواح؟
5. ما ظروف تكون اللاهار والينابيع الحارة ورواسب فيض الرماد؟
6. اذكر أهم الظواهر الخطرة للبراكين.
7. ماذا تدلنا البراكين عن باطن الأرض؟
8. ما خصائص الصخور الفتاتية النارية؟ كيف نفرق بين ريوليت انساب على هيئة لابة وآخر انساب على هيئة طف ريوليتى؟
9. هل تحتوى صخور البورفيرى دائماً على بلورات ظاهرة. ما المعادن التى قد نجدها على هيئة بلورات ظاهرة فى صخر البورفيرى الريوليتى وصخر البورفيرى البازلتى؟
10. كيف يتكون صخر البيومس؟ وما المادة التى يتكون منها؟ لماذا يطفو البيومس فوق الماء؟
11. كيف يختلف طف اللوبيات عن الطف الملحوم؟ وهل يمكن أن يتكون أى من الصخرين نتيجة الثورة من البركان نفسه؟
12. لماذا يكون انحدار سطح البركان الدرعى لطيفاً، بينما يتميز البركان الطباقى بجوانب حادة الانحدار؟
13. اذكر النوع المميز من انسيابات اللابة البازلتية المتكونة نتيجة الانبثاقات تحت سطح الماء، وكيف تتكون تلك الانسيابات.

الفصل

6

التجوية والتعرية

I. التجوية والتعرية ودورة الصخور

II. العوامل التي تؤثر في التجوية :

أ. خصائص الصخر الأصلي

ب. المناخ : هطول المطر ودرجات الحرارة

ج. وجود أو عدم وجود التربة

د. الزمن: فترة التعرض

III. التجوية الكيميائية :

أ. عمليات التجوية الكيميائية.

ب. تأثير التجوية الكيميائية على الصخور الشائعة :

1. تركيز المعادن المستقرة

2. لحاء التجوية

3. التقشر والتجوية الكروية

4. أشكال السطح نتيجة التفاعل مع صخور

الكربونات

ج. الاستقرار الكيميائي : التحكم في سرعة التجوية :

1. الاستقرار الكيميائي

2. سلسلة استقرار المعادن الشائعة المكونة

للصخور

IV. التجوية الطبيعية :

أ. التجوية الطبيعية في المناطق الجافة

ب. التجوية الطبيعية في بقية المناطق

ج. العوامل التي تحدد طريقة تكسر الصخور :

1. نطاقات الضعف الطبيعية

2. نشاط الكائنات الحية

3. التوتد الصقيعي

4. تبلور المعدن

5. تعاقب الحرارة والبرودة (التمدد الحرارى)

6. القوى الأخرى

د. التجوية الطبيعية والتعرية

٧. التربة: راسب متبقى من التجوية :

أ. قطاع التربة

ب. المناخ والزمان وأنواع التربة :

1. المناخ الرطب : اللانيريت

2. المناخ الجاف : البيدوكال

3. المناخ المعتدل : البيدالفير

ج. التربة القديمة : كدليل على المناخ في الأزمنة القديمة

٧. الرواسب المعدنية المتكونة بالتجوية :

أ. الإثراء الثانوى

ب. تركيز الماس

٧. الإنسان كعامل من عوامل التجوية

أشكال فنية جميلة، إلا أنهم لم يتوصلوا إلى معرفة السبب في قابلية هذه الصخور الكربونائية للتحلل. وفي المدن الصناعية الكبرى، فإن نقوش كل المباني المشيدة من الحجر الجيري أو الرخام سواء منها القديمة أو الحديثة تختفى ببطء تحت تأثير الملوثات الناتجة من حرق الوقود. ويعتبر ثاني أكسيد الكبريت والأمطار المحملة بالأحماض من أكثر المواد تأثيراً، حيث تسبب ذوبان الكالسيت المكوّن لهذه الصخور. ونتيجة لذلك، فإن كثيراً من المباني التاريخية في أوروبا، والتي يرجع تاريخ بعضها إلى القرون الوسطى، قد شوهت بدرجة

تضعف كل المواد الصلبة وتفتتت، حتى أكثر الصخور صلابة، عندما تتعرض لتأثير الماء وغازات الغلاف الجوي، إلا أن هذه العملية قد تستغرق آلاف السنين. وقد سعى الناس جاهدين منذ القدم للبحث عن أنواع معينة من الصخور لإنشاء المباني التذكارية وشواهد القبور وغيرها، لاعتقادهم أن الحجر جذاب ويتحمل عوامل الزمن وتأثيراته المختلفة. كما اكتشف اليونانيون والرومان منذ أكثر من ألفي عام أن الحجر الجيري والرخام يصلحان كمواد نموذجية للبناء، لتمييزها بالكثافة العالية وسهولة تشكيلها بالتحس إلى



شكل (1.6): تمثال "أبو الهول" بالجيزة، والذي نحت قبل 2900 سنة قبل الميلاد في طبقات الحجر الجيري النيمبوليتي nummulitic limestone المحتوي على أصداف النيمبوليت Nummulites التي تشبه العملات المعدنية. وقد أثرت عمليات التجوية في تمثال "أبو الهول" فأدت إلى سقوط أجزاء من كتفه، كما أثرت على جسده عموماً وخاصة عند منطقة العنق. وتجري حالياً محاولات جادة لترميم هذا الأثر الفرعوني المهم.

خمس أمتار وحييات دقيقة لا ترى بالعين المجردة ، بالإضافة إلى الأيونات الذائبة في مياه الأمطار والترية .

وعموما ، فإن مجموع الذرات والأيونات التي تنتج عن التجوية الطبيعية والكيميائية تساوي مجموع ذرات وأيونات الصخر الأصلي الذي تمت تجويته . وتُحْمَل هذه المواد المجوأة بعيدا عن مكان التجوية بالرياح والمياه والجليد . وترسب في النهاية كرواسب مختلفة الأنواع ، مثل الرمل والغرين والصلصال الموجودة في وديان الأنهار . ومع مزيد من التقدم في دورة الصخور تدفن هذه الرواسب تحت رواسب إضافية ، وتتحول تدريجيا إلى صخور رسوبية ، وهو ما سيتم مناقشته في فصل الصخور الرسوبية .

1- التجوية والتعرية ودورة الصخور

بعد أن تتكون الجبال نتيجة للعمليات التكتونية (البنائية) والنشاط البركاني ، يعمل التغير الكيميائي والتهشيم الطبيعي بالأمطار والرياح والجليد وحركة هذه المواد أسفل المنحدرات على سطح الأرض على تعرية هذه الجبال ، وهذا هو دور التعرية .

وتعرف التعرية **erosion** بأنها مجموعة العمليات التي تؤدي إلى تفكك الصخور والترية وتحركها بواسطة الرياح أو الجليد أو الماء على المنحدرات إلى الأماكن المنخفضة . وتحمل المواد التي تم تجويتها بعيدا لترسب في مكان آخر على سطح الأرض ، مما يترتب عليه كشف صخور جديدة وتعرضها للتجوية .

وتعمل التجوية والتعرية مع العمليات البنائية والتبركن وغيرها من العناصر الأخرى لدورة الصخور على تغيير شكل سطح الأرض . فبينما يعمل النشاط البركاني والتكتوني على رفع أجزاء من سطح الأرض ، فإن عمليات التجوية والتعرية تعمل بصورة عكسية ، حيث تزيل المواد من المرتفعات إلى مناطق أقل ارتفاعا

كبيرة مثلها مثل بعض أنهار وتماثيل قدماء المصريين (شكل 1.6) .

وستتناول في هذا الفصل بالتفصيل عمليتي التجوية والتعرية . فالتجوية **weathering** هي عملية يتم فيها تفتت الصخور فوق سطح الأرض . وتتكون نتيجة لهذه العملية كل المواد الطينية (الصلصال) وكل أنواع التربة والمواد الذائبة التي تحمل بواسطة الأنهار إلى المحيطات . وتؤثر التجوية بطريقتين:

- التجوية الكيميائية **chemical weathering**

وهي تحدث عندما يتغير التركيب الكيميائي للمعادن الموجودة في الصخر أو حتى تذوب تماما . ويرجع السبب الرئيسي في عدم وضوح أو اختفاء الحروف والنقوش من على شواهد القبور والمباني التذكارية التاريخية إلى التجوية الكيميائية .

- التجوية الطبيعية **physical weathering**

وتعرف أيضا بالتجوية الميكانيكية **mechanical weathering** ، وهي تحدث عندما يفتت الصخر الصلب إلى حبيبات صغيرة نتيجة للعمليات الطبيعية ، ولكنها لا تؤدي إلى تغيير في التركيب الكيميائي للصخور . وقد عملت التجوية الطبيعية على تحويل المعابد اليونانية القديمة إلى كتل صخرية وأعمدة مفتتة ، كما أحدثت الكثير من الكسور والشروخ في المعابد المصرية . وتدعم التجوية الطبيعية التجوية الكيميائية ، حيث يعمل مزيد من التحلل الكيميائي على سرعة تكسر وتفتت الصخر . كما أنه كلما زادت مساحة السطح المعرض للتجوية الكيميائية ، زاد معدل التفكك والتكسر .

وتعتبر التربة واحدة من النواتج العديدة للتجوية ؛ حيث تؤدي العمليات التي تسبب تجوية الصخور إلى تكسرها إلى فئات صخرية يتفاوت في الشكل ، كما يتراوح حجمه بين جلاميد ضخمة يصل قطرها إلى

وتتحكم في عملية تفتيت الصخور وتغييرها كيميائيا أربعة عوامل رئيسية وهى: خصائص (صفات) الصخر الأصلى والمناخ ووجود التربة أو عدم وجودها والفترة الزمنية التى يتعرض فيها الصخر للعوامل الجوية . ونعرض فيما يلى وصفا لكل من هذه العوامل (جدول 1.6).

أ. خصائص الصخر الأصلى

تؤثر طبيعة الصخر الأصلى على معدل تجوية الصخور ؛ وذلك يرجع أساسا إلى نوع المعدن ، حيث تتم تجوية المعادن المختلفة بسرعات مختلفة . كما يؤثر تركيب الصخر structure على قابليته لتكوين الشروخ والكسور . وتقدم الحروف المنقوشة على شواهد القبور القديمة والمحفورة منذ عدة قرون أوضح دليل على أن تجوية الصخور تتم بسرعات

باستمرار . كما تؤدي أيضا إلى تحويل الصخور المختلفة إلى رواسب وتكوين التربة أيضا . وينتج عن التجوية الكيميائية معظم الأملاح المذابة في مياه المحيطات .

وستتناول في الأجزاء الأولى من هذا الفصل التجوية الكيميائية ، لأنها تمثل العامل الأساسى والمحرك الذى يسيّر كل عمليات التجوية ، كما تعتمد التجوية الطبيعية بدرجة كبيرة، رغم أهميتها ، على التحلل الكيميائى . وستتناول أولا العوامل التى تتحكم في التجوية ، ولماذا تتم تجوية بعض الصخور أسرع من الصخور الأخرى ؟

II. العوامل التى تؤثر في التجوية

من المعلوم أن كل الصخور قابلة للتجوية ، إلا أنها تتفاوت في طريقة وسرعة تجويتها ؛ حيث تتجوى بعض الصخور بسرعة أكبر من الصخور الأخرى .

جدول (1.6): العوامل الرئيسية التى تتحكم في معدلات التجوية

معدل التجوية			
بطيء	←	سريع	
خصائص الصخر الأصلى قابلية ذوبان المعدن	منخفضة (مثل الكوارتز)	متوسطة (مثل: البيروكسين والفلسبار)	عالية (مثل: الكالسيت)
تركيب الصخر	كثلى	به بعض نطاقات الضعف	به كسور عديدة أو مكون من طبقات رقيقة
المناخ			
هطول الأمطار	منخفض	متوسط	غزير
درجة الحرارة	باردة	معتدلة	ساخنة
وجود أو عدم وجود تربة سمك طبقة التربة	منعدمة- الصخر عار	رقيق إلى متوسط	سميك
النشاط العضوى	ضئيل	متوسط	وفير
فترة التعرض	قصيرة	متوسطة	طويلة

تعرض فترة كافية لعوامل التجوية . فالآثار الجرانيتية ستبدو الكتابة عليها باهتة وغير واضحة بعد عدة مئات من السنين، حيث تبدأ بلورات الفلسبارات في التآكل

مختلفة؛ فالحروف المنقوشة على شواهد القبور الحديثة تبدو واضحة على سطح صخر الحجر الجيري وذات حدود حادة . أما بعد مئات السنين ، وفي طقس



شكل (2.6): أثر التجوية على الأنواع المختلفة من الصخور ، كما توضحه شواهد القبور القائمة في أوائل القرن التاسع عشر في ولاية ماساشوستس في أمريكا . فقد تجمى الشاهد المصنوع من الحجر الجيري (على اليمين) بدرجة لا يمكن قراءة الكتابة عليه ، بينما احتفظ الشاهد المصنوع من الإردواز (على اليسار) بالكتابة تحت نفس الظروف.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

لتنحول إلى معادن جديدة ، بينما يبقى معدن الكوارتز دون أى تغيير .

كما يؤثر تركيب الصخر structure أيضا في التجوية الطبيعية . فقد بقيت الآثار الفرعونية القديمة المصنوعة من الجرانيت سليمة وغير مكسرة أو مشرخة لعدة قرون بعد تشييدها ، بينما على العكس من ذلك ، قد يتكسر الصخر المكون من الطفيل ، وهو صخر

مطر فإنها تبدو باهتة ، كما لو أن الحروف المنقوشة عليها قد أزيلت ، مثلما تزال الكتابة من على قطعة الصابون بعد استعمالها عدة مرات . أما لوحات الإردواز والجرانيت فلا يظهر عليها إلا القليل من التغير (شكل 2.6) . ويعكس الاختلاف في تجوية صخري الجرانيت والحجر الجيري الاختلاف في قابلية ذوبان solubility المعادن المكونة لها في الماء . ومع ذلك ، فإن الصخر المقاوم للتغير يمكن أن يتغير ويتحلل تحللا كاملاً إذا

نتيجة تأثير الصقيع ، حيث يكسى سطح الأرض
بأكوام من الحجارة المزاحة .

ويظهر تأثير المناخ climate في الاختلاف الواضح
في نواتج تجوية الصخور الكربوناتية . فالصخور
الجيرية التى تتكون من معدن الكالسيت القابل
للذوبان بسهولة مثل الحجر الجيري والرخام ، تكون
سريعة التأثير بالتجوية الكيميائية في المناخ الرطب ، مما
يؤدى إلى تكوين معالم طوبوغرافية منخفضة ولطيفة
الانحدار . أما في المناخ الجاف ، فإن هذه الصخور
تكون طوبوغرافية حادة ، عبارة عن جروف (الجرف
منحدر صخري شديد) (شكل 3.6) ؛ حيث تؤدى
ندرة المطر وشح الغطاء النباتي إلى قلة حامض
الكرونيك القادر على إذابة المعادن الكربوناتية .

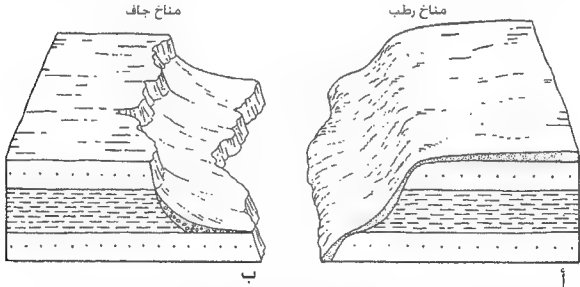
ج. وجود أو عدم وجود التربة

تعتبر التربة أحد أهم المصادر الطبيعية المهمة لأى
دولة . وتتكون التربة soil من كسرات من صخور

رسوبية ، بسهولة على امتداد مستويات التطبيق إلى قطع
صغيرة .

ب. المناخ : هطول المطر ودرجات الحرارة

يتمحكم المناخ بدرجة كبيرة في معدل التجوية
الكيميائية . ويؤثر هطول الأمطار (رطوبة الجو) وتغير
درجة الحرارة على سرعة التجوية ، حيث تعمل الحرارة
والرطوبة المرتفعة على تنشيط التفاعلات الكيميائية .
ولذلك فإنه ليس من المستغرب أن تكون التجوية أشد
قوة وتعمل على أعماق أكبر في الأرض ، في مناطق المناخ
الدافئ الرطب عنها في مناطق المناخ الجاف البارد . ففى
المناطق الاستوائية الرطبة مثل وسط أمريكا وجنوب
شرق آسيا تبدو التجوية الكيميائية واضحة ، بينما في
المناطق الباردة الجافة مثل شمال جرينلاند والقارة
القطبية الجنوبية (أنтарكتيكا) تكون التجوية الكيميائية
بطيئة جداً . وعلى العكس من ذلك ، فإن التجوية
الطبيعية تكون واضحة في تلك المناطق الباردة الجافة



شكل (3.6): تأثير المناخ على المنحدرات وشكل مقطع الأودية

(أ) في المناخ الرطب ، تغطى الطبقات الصخرية بغطاء من الصخور التي جويت كيميائياً ، وتكون المنحدرات لطيفة الانحدار .

(ب) في المناخ الجاف ، تكون الطبقات الصخرية المقاومة للتعرية هضاباً وجروفاً ، وتكون المنحدرات شديدة الانحدار .

(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

مستقيمات ، وتحيط بالصخر الذى لم يتغير أو يتجوى . وتتكون هذه اللحاءات ببطء يصل إلى 0.006 مم كل ألف سنة في المناخ الجاف، بينما تكون فترة تعرض اللابات ورواسب الرماد البركاني المنبثق حديثا من البراكين على سطح الأرض قصيرة جدا ، ولذلك تكون تقريبا غير مجوة .

ويؤثر مجموع العوامل السابقة في تحديد نوع ومعدل تجوية الصخور في أى منطقة . ويوجد عموما بعض الاختلاف والتباين في تجوية الصخور ، حتى على مستوى منطقة صغيرة نسبيا من الأرض . والتجوية المتفاوتة differential weathering هى تجوية الصخور المنكشفة على سطح الأرض بمعدلات مختلفة أو غير منتظمة ، بسبب الاختلاف في صلابة ومقاومة مواد السطح . وتآكل الصخور الأقل صلابة ومقاومة بمعدلات أسرع ، في حين تظل الصخور الأصعب بارزة وناتئة . وتسؤد التجوية المتفاوتة والتعرية اللاحقة لها إلى تكوّن عديد من الأشكال والمعالم الأرضية ، مثل الجسور الطبيعية natural bridges الموجودة في يوتا بالولايات المتحدة الأمريكية . كما تشمل تلك المعالم الأرضية أيضا حقول الجلاميد boulder fields ، وهى مساحات واسعة جدا عادة ومسطحة تنتشر عليها الجلاميد المستديرة . ويعزى وجود هذه الجلاميد إلى التجوية الكيميائية ، إذ إن معظم الصخور تحمل درنات صخرية concretions مختلفة الأحجام من مادة مختلفة عن الصخور (عادة من الصوان) تكون أكثر صلابة من الحجر الجيرى . وعند تعرض الصخر الأصلى للتجوية الكيميائية نتيجة لتأثير المياه الجوفية أو مياه الأمطار ، فإن المكونات الجيرية تذوب بمعدل أسرع من معدل ذوبان الدرنات التى قد لا تستجيب للتجوية الكيميائية . وبذلك يتآكل الصخر

الأساس bedrock (الصخر الصلد المتصل والموجود تحت الرواسب المترامية غير المتصلدة) ومعادن الصلصال المتكونة من تغيير معادن صخر الأساس والمادة العضوية الناتجة من الكائنات العضوية التى تعيش فيها . وعلى الرغم من أن التربة نتج من عملية التجوية ، إلا أن وجودها أو عدم وجودها يؤثر على التجوية الفيزيائية والكيميائية للمواد الأخرى ؛ فالمعدن الموجود في تربة وادى منخفض مغطى بالتربة يتحلل أسرع ، مما إذا وجد في جرف قريب لا يغطيه أى نوع من التربة ، حيث تحمل الأمطار الحبيبات المفككة إلى مناطق منخفضة يمكن أن تترام فيها تلك الحبيبات .

وتتكون التربة نتيجة عملية استرجاع موجهة ؛ أى إن التربة وهى ناتج عملية التجوية تساعد في تقدم التجوية . فبمجرد أن تبدأ التربة في التكوّن ، فإنها تدخل كأحد العوامل الجيولوجية التى تعمل على تجوية الصخور بسرعة أكبر . وتحفظ التربة بمياه الأمطار وأنواع مختلفة من النباتات ، والكثير من البكتريا والكائنات الحية الأخرى ، التى تعمل على تكوين بيئة حامضية تنشط التجوية الكيميائية ، وهى تعمل على تغيير وإذابة المعادن ، كما تساعد جذور النباتات والكائنات الحية المتحركة خلال التربة على التجوية الفيزيائية بما تحثه من شقوق وكسور . وتعمل التجوية الطبيعية والكيميائية بدورها على إنتاج المزيد من التربة .

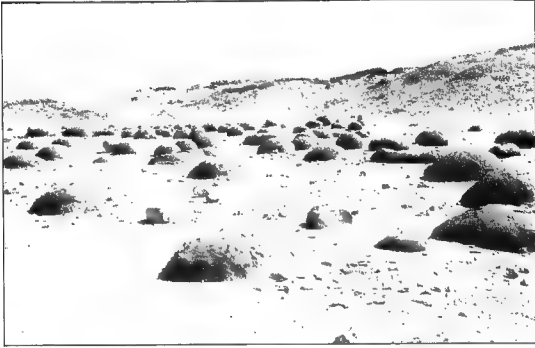
د. الزمن: فترة التعرض

من الطبيعى أنه كلما كانت الفترة الزمنية التى تتعرض فيها الصخور للتجوية أطول ، زادت نسبة تغييرها وإذابتها وتكسرها . فالصخور التى انكشفت على سطح الأرض لعدة آلاف من السنين يتكون فوقها لحاء (قشرة) ، وهى طبقة خارجية من المواد الناتجة من التجوية يتراوح سمكها بين عدة ميليمترات وعدة

III. التجوية الكيميائية

عندما تتعرض المعادن المكونة للصخور النارية والمتحولة ، والتي تكونت أصلا عند درجات حرارة

الأصل خلفا وراء كميات كبيرة من الدرنات المختلفة الحجم . ومن أمثلة ذلك حقول الجلاميد الموجودة في شمال الواحات البحرية ، وتلك الموجودة على طريق أسيوط - الخارجة بالصحراء الغربية المصرية

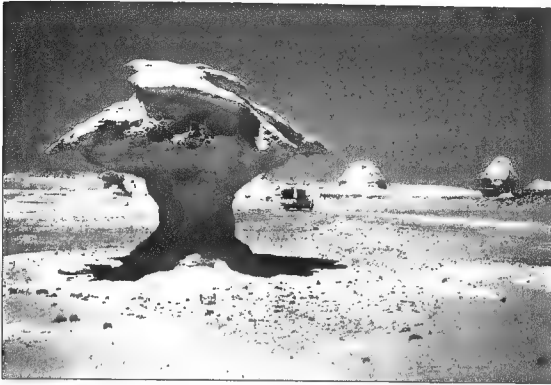


شكل (4.6) : حقول الجلاميد boulder fields على طريق أسيوط - الخارجة ، الصحراء الغربية - مصر .

وضغط عالين ، لدرجات حرارة وضغط أقل عند سطح الأرض ، فإنها تصبح غير مستقرة كيميائيا . وتتحلل مثل هذه المعادن إلى مكونات ، تعطى معادن جديدة أكثر استقرارا عند سطح الأرض أو بالقرب منها.

وتحدث تفاعلات كيميائية عديدة أثناء التجوية الكيميائية بين المعادن المكونة للصخور المختلفة ومكونات الهواء والماء ؛ حيث تؤدي تجوية الصخور إلى إذابة بعض المعادن المكونة للصخور ، بينما يتحد بعضها الآخر مع الماء وغيره من مكونات الغلاف الجوي مثل الأكسجين وثنائي أكسيد الكربون ، لتكوين مركبات

(شكل 4.6) . كما تشمل تلك المعالم الأرضية أيضا ما يسمى بصخور عيش الغراب (موائد الشيطان) mushroom rocks ، وهي تتجعد عندما توجد طبقة من صخر صلد تعلو طبقة أخرى من صخر أقل صلادة ، فتتآكل الطبقة السفلى بمعدل أسرع بفعل الرياح من معدل تآكل الطبقة العليا . وخير مثال على تلك الموائد ما يوجد منها في الصحراء البيضاء White Desert في شمال واحة الفرافرة بالصحراء الغربية المصرية ؛ حيث تؤدي التجوية متفاوتة لصخور الطباشير إلى تكوين تلك الموائد (شكل 4.6) .



شكل (5.6): صخور عيش الغراب (موائد الشيطان) mushroom rocks، وهى نتيج من تآكل صخور الطبقة السفلى الأقل صلادة عن صخور الطبقة العليا بفعل الرياح، الصحراء البيضاء - الفرافرة - مصر .

أخرى. ويتأين حامض الكربونيك ليكون أيونات هيدروجين وبيكربونات حسب المعادلة التالية:

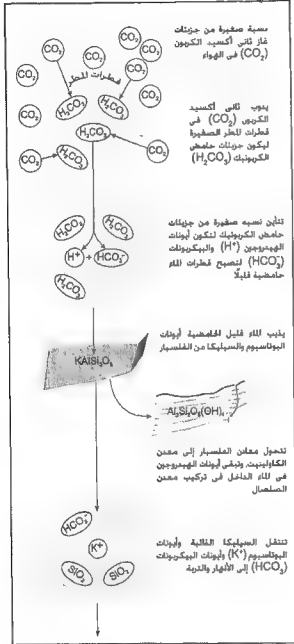


وأيونات الهيدروجين هى أيونات صغيرة جدا تحمل شحنة واحدة موجبة بدرجة تسمح بأن تحمل محل الأيونات الموجبة الأخرى مثل Ca^{2+} ، أو Na^{+} أو K^{+} داخل البنية البلورية للمعادن . ويؤدى هذا الإحلال إلى تغير التركيب المعدنى للمعدن وتحطيم بنيته البلورية. وغالبا ما يتحلل المعدن إلى معدن آخر مختلف عندما يتعرض لحامض ما .

كيميائية هى عبارة عن معادن جديدة . وتكون التجوية الكيميائية أكثر وضوحا فى المناطق التى تكون درجات الحرارة وسقوط الأمطار فيها عالية ، حيث إن تلك العوامل تزيد من سرعة التفاعلات الكيميائية .

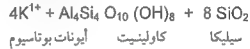
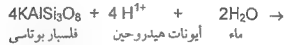
أ- عمليات التجوية الكيميائية

التحلل المائى: عندما يتساقط ماء المطر من الغلاف الجوى ، فإنه يذيب كميات صغيرة من ثانى أكسيد الكربون ويتكون حامض الكربونيك carbonic acid . وعندما يتحرك هذا الماء المحتوى على حامض الكربونيك الضعيف فى التربة ، فإنه يذيب كميات إضافية من ثانى أكسيد الكربون المتكون نتيجة تحلل بقايا النباتات والحيوانات ، بالإضافة إلى أحماض



شكل (6.6) تجوية الفلسبار البوتاسي بحامض الكربونيك المتكون نتيجة وجود ثاني أكسيد الكربون في ماء المطر. وتؤدي التجوية إلى تكون ناتجين: الكاولينيت وهو أحد معادن الصلصال، وعطول يخترق على سيليكا ذائبة وأيونات بوتاسيوم وأيونات بيكربونات.

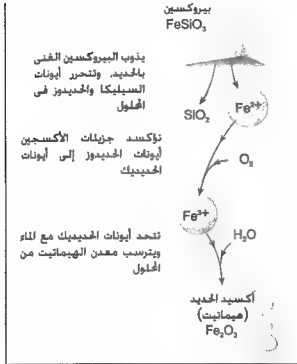
وتوضح المعادلة التالية الطريقة التي يتحلل بها معدن الفلسبار البوتاسي، وهو أحد المعادن المكونة للصخور الشائعة، بواسطة حامض الكربونيك وتأثير أيون الهيدروجين H^+ في تحلل المعادن (شكل 6.6):



فتدخل أيونات الهيدروجين H^+ في معدن الفلسبار البوتاسي، وتحلل محل أيونات البوتاسيوم التي يحملها السائل خارج البلورة، بينما يتحد الماء مع جزيئات السيليكات الألومنيوم المتبقية ليكون معدن الكاولينيت (سيليكات الألومنيوم المائية) نتيجة للتجوية الكيميائية، حيث لم يكن موجوداً في الصخر الأصلي. ويسمى هذا التفاعل الذي يكتسب فيه الفلسبار الماء بالتميم **hydration**. ومعدن الكاولينيت أحد معادن مجموعة الصلصال الشحيحة الذوبان التي تكون جزءاً أساسياً من الحطام الصخري (الآديم) فوق سطح الأرض. ويسمى التفاعل الكيميائي الذي تحلل فيه أيونات الهيدروجين H^+ أو الهيدروكسيل OH^- من الماء، محل أيونات في المعدن بالتحلل المائي **hydrolysis**. وتعتبر هذه العملية إحدى عمليات التجوية الكيميائية الرئيسية التي تسبب تحلل الصخور الشائعة.

الغسل: يعتبر الغسل **leaching** من العمليات الشائعة في التجوية الكيميائية، وهو يعبر عن الإزالة المستمرة للمواد المذابة بالمحاليل المائية من صخر الأساس **bedrock** أو الحطام الصخري (الآديم) **regolith**. وعلى سبيل المثال، فعندما تتحرر السيليكا من الصخور نتيجة التجوية الكيميائية، فإن بعضها يبقى في الحطام الصخري الغني بمعادن الصلصال،

$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (ويمثل الرمز n رقماً صحيحاً صغيراً مثل 1 أو 2 أو 3 ليوضح كمية الماء المتغيرة).



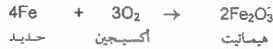
شكل (7.6): التفاعلات الكيميائية التي يتجوى بها معدن غنى بالحديد، مثل: البيروكسين، في وجود الأكسجين والماء.

(After Presa, F. and Slever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

الذوبان: إن معدن الأوليفين الذي يتم تجويته بسرعة بالنسبة لباقي معادن السيليكات، يكون بطيء الذوبان نسبياً، مقارنة بالمعادن الأخرى المكونة للصخور. فالحجر الجيري والمكون من معادن كربونات الكالسيوم والمغنسيوم (الكالسيت ودولوميت) هو إحدى الصخور التي يتم تجويتها بسرعة كبيرة في المناطق الرطبة. ويظهر على المباني الجيرية القديمة أثر الذوبان بسبب مياه الأمطار. وتذيب المياه الجوفية كميات كبيرة من معادن الكربونات في صخور الحجر الجيري وتجوفها لتكوّن كهوفاً في هذه الصخور. ويستخدم المزارعون الحجر الجيري ليعادل الحامضية في التربة بسبب قابلية الحجر الجيري للذوبان بسرعة. ويلاحظ أنه عندما يذوب الحجر الجيري النقي

وبعضها الآخر تحمله المياه المتحركة في الأرض ببطء. ويتم أيضاً حل عديد من أيونات البوتاسيوم الناتج من تجوية الصخور في المحاليل. وتوجد الأيونات التي تم إذابتها من الصخور أثناء التجوية في كل المياه السطحية والمياه الجوفية تحت سطح الأرض. وقد يزيد تركيز هذه الأيونات بدرجة كبيرة بحيث تجعل للماء طعماً غير مستساغ.

الأكسدة: يتكوّن الصدأ عندما يتحد الأكسجين مع الحديد ليكون أكسيد الحديد، كما يلي:



ويحدث هذا التفاعل الكيميائي والذي يطلق عليه الأكسدة oxidation عندما يفقد عنصر ما إلكترونات خلال التفاعل. ويقال في هذا التفاعل، إن الحديد قد تأكسد لأنه فقد إلكترونات اكتسبها الأكسجين، ويتأكسد الحديد ببطء شديد في البيئة الجافة، بينما تزيد إضافة الماء من سرعة التفاعل بدرجة كبيرة.

والأكسدة عملية مهمة في تحليل المعادن، مثل مجموعة المعادن الحديدومغنيسية (الأوليفين والبيروكسينات والأمفيبولات والبيوتيت). وفي معادن السيليكات الحديدومغنيسية لا بد أن ينفصل الحديد أولاً من السيليكات البنية البلورية للمعدن قبل أن يتأكسد (شكل 7.6). وأكسيد الحديد المتكوّن هو معدن الهيماتيت (Fe_2O_3)، الذي يتميز مسحوقه بلون بني محمر. وفي وجود الماء، كما هو الحال عند سطح الأرض غالباً، فإن أكسيد الحديد يتحد مع الماء ليتكوّن الليمونيت limonite، وهو اسم لمجموعة من أكاسيد الحديد المائية، والتي تكون غير متبلورة غالباً (تحتوى غالباً على معدن الجوثيت)، والتي تتميز مسحوقها بلون بني مصفر. والرمز العام لتلك المجموعة هو

وعندما يتم تجوية الحجر الجيري بالإذابة ، وهو أكثر صخور الكربونات شيوعاً ، فإن أيونات الكالسيوم والبيكربونات ستذوب من الصخور خلفه الشوائب غير القابلة للذوبان فقط (أساساً معادن الصلصال clay minerals والكوارتز) ، والتي تتواجد دائماً بكميات صغيرة في الصخر. لذلك ، فإنه عندما يتم تجوية الحجر الجيري كيميائياً ، فإن الغلاف الصخري المتبقى يتكون أساساً من معادن الصلصال والكوارتز.

1 - تركيز المعادن المستقرة

هناك عدد من المعادن ، ومنها معدن الكوارتز ، تكون مقاومة بشدة للتجوية الكيميائية عند سطح الأرض . وتبقى بعض المعادن المقاومة للتجوية الكيميائية مثل الذهب والبلاتين والماس في الحطام الصخري الذي تم تجويته ؛ حيث يتم تعريته وتكون راسباً . وتتميز بعض هذه المعادن بكثافة نوعية أعلى من المعادن الأخرى الشائعة مثل الكوارتز . ولذلك فإنه يتم تركيزها ضمن طبقات الأنهار أو المجاري المائية عموماً أو على امتداد شواطئ البحار . وقد يتم تركيز بعض هذه الرواسب بدرجة تسمح بتكوين رواسب معدنية ذات قيمة اقتصادية.

2 - لحاء التجوية

إذا كسرت حصة كبيرة (جليمود) من البازلت الذي تم تجويته ، فلنأخذ عادة لحاء فاتح اللون يحيط بلب أغرق لوناً من صخر لم يتغير (شكل 8.6) . ويتكون هذا اللحاء من نواتج صلبة تكونت نتيجة التجوية الكيميائية وتسمى لحاء تجوية **weathering rind** . وتبدأ التجوية عند السطح المنكشف غير المجوى ويعتمد ببطء إلى الداخل . وتشمل عادة تلك التجوية أكسدة المعادن الغنية بالحديد ونزع (إزالة) الماء dehydration من هيدروكسيد الحديد لتكوين

لا يتكون الصلصال وتذوب الأجزاء الصلبة تماماً ، وتحمل مكوناتها في السوائل ويطلق على هذه العملية الإذابة **dissolution** ، وهي من عمليات التجوية الكيميائية المهمة . ويزيد وجود حامض الكربونيك من إذابة الحجر الجيري ، بالإضافة إلى تجوية المعادن السيليكاتية . وتمثل المعادلة التالية التفاعل الذي يذوب فيه الكالسيت ، وهو المعدن الرئيسي في الحجر الجيري ، في مياه الأمطار أو أي مياه أخرى تحتوي على ثاني أكسيد الكربون:



كالكسيت حامض الكربونيك



أيون كالسيوم أيون بيكربونات

ب. تأثير التجوية الكيميائية على الصخور الشائعة

تعتمد المعادن والأيونات القابلة للذوبان ، والتي تتكون عندما يتم تجوية صخر ناري كيميائياً ، على التركيب المعدني للصخر . فمحتوى الجرانيت من السيليكات أعلى منه في البازلت ، كما أن تركيبها المعدني مختلف . ويحتوي صخر الجرانيت على الكوارتز ، وهو غير نشط في التفاعل كيميائياً ، بالإضافة إلى المعادن التي تحتوي على البوتاسيوم مثل الفلسبار البوتاسي والمسكوفيت وقليلاً من المعادن الغنية في الحديد والماغنسيوم . وعندما يتحلل صخر الجرانيت بالتحلل المائي ، حيث يتم تجوية الفلسبار والميكا والمعادن الحديديومغنيسية إلى معادن الصلصال والأيونات الذائبة Na^+ ، K^+ ، Mg^{2+} ، وتبقى معدن الكوارتز ، وهو غير نشط كيميائياً ، دون تحلل . ويتم تجوية الفلسبار والمعادن الحديديومغنيسية في صخر البازلت إلى معادن الصلصال والأيونات الذائبة Mg^{2+} ، Ca^{2+} ، Na^+ بينما يتم تجوية معدن الماغنيتيت إلى الجوثيت.

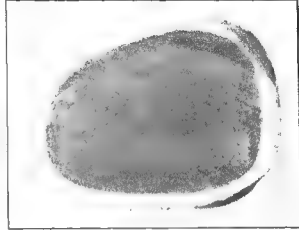
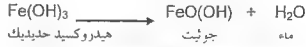
3 - التقشر والتجوية الكروية

قد تنخلع أغلفة متحدة المركز من السطح الخارجي لصخور منكشف أو جلمود صخرى ، في عملية تعرف بالتقشر **exfoliation** (شكل 9.6) . ويوجد أحيانا غلاف واحد من القشور ، كما قد تكون عشرة أغلفة أو أكثر ، مما يعطى الصخر مظهر البصل .

ويتج التقشر من الضغوط المتباينة في الصخر والتي تنتج أساسا من التجوية الكيميائية . فمثلا ، عندما يتم تجوية القلبيارات إلى الصلصال ، فإن حجم الصخر المجوى يكون أكبر من حجم الصخر الأصل . وتسبب الضغوط المتكونة في انفصال أغلفة رقيقة من الصخر من كتلة الصخر الرئيسية غير المجواة .

وتؤدي التجوية الكيميائية تحت سطح الأرض إلى تكون هالة من الصخر المتحلل حول لب صخرى غير متحلل . فإذا بدأنا بمكعب من صخر صلب لم يتم

الجوثيت goethite مما يعطى للحاء المتكون لونا بنيا فاتحا . كما توضح المعادلة التالية:



شكل (8.6): حجر من البازلت بين لحاء تجوية weathering rind يبلغ سمكه 2 مم ، يحيط بلب أسود لم يتم تجويته ، من شرق كاسكادريج في واشنطن .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).



شكل (9.6). كتل مستديرة من صخر الجرانيت بمنطقة جبل النيجي بالصحراء الشرقية بمصر ، توضح وجود عدة أغلفة تشبه البصل ، تكونت نتيجة عمليتي التقشر **exfoliation** والتجوية الكروية **spheroidal weathering** .

الملاحم الطبوغرافية في الفصل الثالث عشر الذى يناقش المياه الجوفية .

جـ. الاستقرار الكيميائى: التحكم فى سرعة التجوية

على الرغم من أن الصخور المكوّنة من السيليكات تغطى مساحات أكبر بكثير من تلك التى تغطيها الصخور الكربونانية ، إلا أن تجوية الحجر الجيرى تمثل أكبر نسبة من التجوية الكيميائية لسطح الأرض عن أى صخر آخر . ويرجع السبب فى ذلك إلى أن المعادن الكربونانية تذوب أسرع وبكميات كبيرة عن أى سيليكات . وتغطى معدلات التجوية للمعادن مدى كبير يتراوح من المعدلات السريعة للكربونات إلى المعدل البطيء للكوارتز . وتعكس المعدلات المختلفة التى تتم عندها تجوية المعادن مدى الاستقرار الكيميائى للمعادن فى ظروف التجوية - أى وجود الماء عند درجات حرارة سطح الأرض .

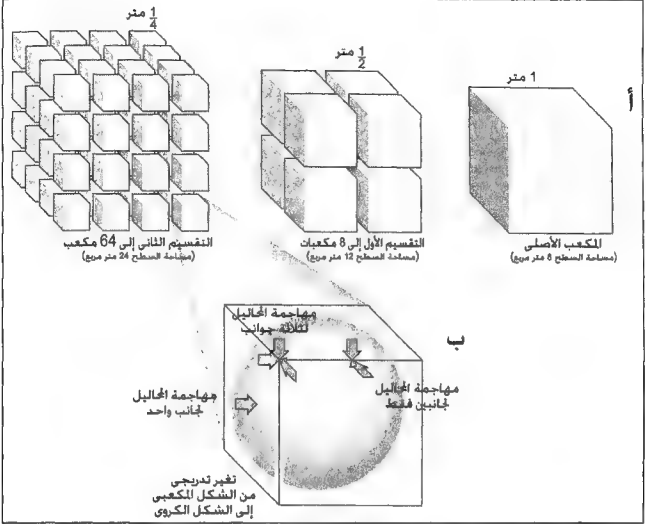
1 - الاستقرار الكيميائى

يعرف الاستقرار الكيميائى chemical stability بأنه قياس قابلية مادة كيميائية ما لأن تبقى فى شكل كيميائى معين فضلاً عن أن تتفاعل تلقائياً لتكوّن شكلاً كيميائياً آخر . ويمكن تشبيه هذا الاستقرار الكيميائى لحد ما بالاستقرار الميكانيكى . فالكتاب الموضوع على منضدة يكون مستقراً ويستمر فى هذا الوضع ما لم يتم تحريكه . أما الكتاب الموضوع على حافة المنضدة فإنه يكون غير مستقر ، حيث يتسبب أى اهتزاز فى سقوطه . وكما هو الحال مع الكتاب المسطح المستقر ميكانيكياً ، يكون فلز حديد النيازك القادم من الفضاء الخارجى مستقر كيميائياً ، حيث لا يتعرض لأى أكسجين أو ماء ، ويبقى الحديد مستقرًا بلايين السنين . أما إذا سقط هذا النيزك على الأرض ، فستتعرض للأكسجين والماء ليصبح غير مستقر كيميائياً ، ويتفاعل تلقائياً ليكوّن أكسيد حديدك .

تجوّيته، فإن الماء المتحرك على امتداد الفواصل يتفاعل مع الصخر من كل الجوانب، حيث يقل حجم الصخر غير المتحلل ويصبح كروياً (شكل 9.6) فى عملية تعرف بالتجوية الكروية spheroidal weathering . ويمكن رؤية الجلاميد المتكونة نتيجة التجوية فوق الأسطح غير المجوأة . ونلاحظ هنا علاقيتين مهمتين هما أن تأثير التجوية الكيميائية يزداد كلما زادت مساحة السطح المعرض للتجوية . فتقسيم مكعب من الصخر يزيد مساحة السطح المعرض للتجوية دون أى إضافة إلى حجم هذا المكعب (شكل 10.6) . وتؤدى عملية التقسيم المستمر والمتكرر إلى تأثير ملموس فى الصخر . فعندما يقسم مكعب من الصخر طول ضلعه 1 سم ومساحة سطحه 6 سم² إلى أقسام فى حجم معادن الصلصال الصغيرة ، فإن مساحة السطح تزداد إلى نحو 40 مليون سم² . وهكذا تؤدى عملية التجوية الكيميائية إلى زيادة واضحة فى مساحة السطح المعرض ، مما يؤدى إلى استمرار وزيادة عملية التجوية .

4 - أشكال السطح نتيجة التفاعل مع صخور الكربونات

يؤدى تفاعل حمض الكربونيك مع الحجر الجيرى إلى تكون العديد من أشكال السطح، والتى تكون غالباً ذات أبعاد صغيرة . وتتكون على مكاشف الحجر الجيرى أشكال مختلفة مثل التجاويف القاعية cups والتى تأخذ شكل الفنجان ، والأخاديد grooves والقنوات الضحلة flutes فى نمط متشابك . وقد تمتع الأخاديد العميقة والصخور التى تشبه الحوائط المعلقة مرور الناس خلالها . وتؤدى إذابة حامض الكربونيك للحجر الجيرى إلى تكون كهوف تحت سطح الأرض بالإضافة إلى معالم أرضية مميزة تتكون نتيجة انهار الكهوف تحت سطح الأرض . وسوف يتم مناقشة تلك



شكل (10.6): تقسيم وتجويع مكعبات الصخور

(أ) يُقسم المكعب في كل مرة عند منتصف كل حافة، مما يترتب عليه تضاعف مساحة السطح الخارجي منه وزيادة معدل التجوية الكيميائية. (ب) تهاجم المحاليل المتحركة عبر الفواصل أركان وحواف وجوانب الأشكال المكعبة بمعدل يتناقص بنفس الترتيب، لأن عدد الأسطح المقابلة والمعرضة لتأثير التجوية هي 2 و 3 و 1. وتصبح الأركان مستديرة، وتأخذ المكعبات في النهاية الشكل الكروي. وبمجرد الوصول للشكل الكروي، يصبح معدل التجوية متساوياً على كل الأسطح، ولا يحدث تغير يذكر في الشكل.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

خاصيتان للمعدن مدى استقراره الكيميائي وهما:
قابليته للذوبان ومعدل ذوبانه.

قابلية الذوبان: تقاس قابلية ذوبان **solubility** معدن معين، بكمية المعدن المذابة في الماء حتى يصل المحلول إلى نقطة التشبع - وهي النقطة التي لا يستطيع عندها الماء أن يحتفظ بأي كمية أخرى من المادة المذابة. وكلما زادت قابلية ذوبان المعدن قلت درجة استقراره

والمواد الكيميائية تكون مستقرة أو غير مستقرة نتيجة علاقتها ببيئة معينة أو تواجدها تحت مجموعة معينة من الظروف. فعلى سبيل المثال: يكون الفلسبار مستقرًا عند تواجده في عمق القشرة الأرضية (أي تحت درجات حرارة مرتفعة وكميات قليلة من الماء)، إلا أنه يصبح غير مستقر تحت الظروف السائدة عند سطح الأرض (درجات حرارة منخفضة ووفرة الماء). وتحدد

السلسلة عكس وضعها في سلسلة بوين التفاعلية ، والتي تضم معادن السيليكات مرتبة في قائمة طبقا للترتيب الذى تبلور به هذه المعادن من صهارة بازلتية . وبين جدول (2.6) أيضا سلسلة بوين التفاعلية . ويمكن ملاحظة أن الأوليفين والبلاجيوكليس الكلسي هما أول المعادن تبلورا أثناء تبرد الصهارة ، مما يدل على ثباتها واستقرارها عند درجات الحرارة والضغط العالية . وهما أيضا أقل المعادن استقرارا عند التجوية ، وأول المعادن التى تختفى عند تعرضها على سطح الأرض عند درجة الحرارة والضغط المنخفضين .

وتحدد طبيعة الروابط الكيميائية التى تميز البنية البلورية لمعادن السيليكات الاستقرار النسبى لتلك المعادن ، والذى ينعكس خلال سلسلة الاستقرار وأثناء التجوية . وتتكون معادن السيليكات الأقل استقرارا أثناء التجوية من رابعيات السيليكات المفردة . وتميز هذه البنية البلورية معادن الأوليفين الذى يظهر قرب نهاية القائمة الأولى في جدول (2.6) ، وبلى ذلك سيليكات السلسلة المفردة (البيروكسينات) وسيليكات السلسلة المزدوجة (الأمفيبولات) والتى تعتبر إلى حد ما أكثر استقرارا من الأوليفين . وبلى ذلك في درجة الاستقرار السيليكات الصفائحية (الميكا) ومعادن الصلصال ، والسيليكات الإطارية (الهيكليّة) مثل الكوارتز ثم أكاسيد الحديد والألومنيوم .

وبالإضافة إلى الكوارتز ، فهناك أيضا عدد من المعادن الأخرى التى تقاوم بشدة التجوية الكيميائية عند سطح الأرض . ويتم تعرية بعض المعادن مثل الذهب والبلاتين والماس والتى استمر بقاؤها في الحطام الصخري الذى تم تجويته ، لتكون راسبا في النهاية . وقد تركز بعض هذه المعادن ، والتى تتميز بكثافة نوعية أعلى من المعادن الشائعة مثل الكوارتز ، في طبقات المجارى المائية ، أو على شواطئ البحار

أثناء عملية التجوية . فمثلاً يكون الملح الصخري (المكون من معدن الهاليت وهو ملح الطعام) غير مستقر عند ظروف التجوية ، حيث إنه يذوب بدرجة عالية في الماء ويتم غسله وإذابته من التربة بأى كمية صغيرة من الماء . وعلى العكس ، يكون الكوارتز مستقرا بدرجة معقولة تحت معظم ظروف التجوية ، حيث إن ذوبانه في الماء منخفض جدا (في حدود 0.008 جرام لكل لتر من الماء تقريبا) ، ولا يفسل أو يذاب من التربة بسهولة .

معدل الذوبان: يقاس معدل ذوبان rate of dissolution معدن ، بكمية المعدن التى تذوب في محلول غير مشبع في وقت محدد . وكلما كان ذوبان المعدن أسرع ، كان أقل استقرارا . فالفلسبار يذوب بمعدل أسرع من الكوارتز ، ولذا فهو أقل استقرارا منه عند ظروف التجوية العادية .

2 - سلسلة استقرار المعادن الشائعة المكونة للصخور

تكون التجوية الكيميائية شديدة في الغابات الاستوائية المطيرة ، حيث لا يبقى في المنكشفات أو في التربة إلا أكثر المعادن استقرارا . أما في المناطق الصحراوية الجافة في شمال إفريقيا ، وكما هو الحال في الصحارى المصرية ، فإن التجوية تكون ضعيفة ، حيث تبقى الآثار المصنوعة من الألباستر سليمة دون تحلل ، كما تبقى الكثير من المعادن غير المستقرة سليمة . لذلك ، فإن معرفة الاستقرار الكيميائي النسبى للمعادن المختلفة تساعد في توقع مدى التجوية في منطقة معينة . ولقد تم مقارنة مدى استقرار كل المعادن الشائعة والمكونة للصخور وتم تجميعها في سلسلة تعرف بسلسلة استقرار stability series المعادن (جدول 2.6) . وهى تتراوح بين معادن الملح والكريونات عند أقل حد للاستقرار إلى أكاسيد الحديد عند أكبر حد للاستقرار . ويكون وضع معادن السيليكات في هذه

rubble ، وهذا التجمع هو المقابل غير المتصلد للبريشيا breccia . ويعكس الاختلاف في حجم الكسرات الدرجات المختلفة للتجوية الطبيعية ، ونمط تكسر الصخور الأصلية نتيجة لاستمرار التجوية الطبيعية ، حيث تحدث شروخ في الكسرات الكبيرة ، والتي تتكسر إلى كسرات أصغر ، وقد تحدث بعض هذه الكسور على امتداد مستويات الضعف في الصخر الأصلي . وتتكون حبيبات الرمل عندما تتكسر وتفصل بلورات المعادن المختلفة عن بعضها البعض ، كما في حالة معدن الكوارتز ، أو عندما تتكسر الصخور دقيقة التجب مثل البازلت ، وحبيبات الصلصال هي أدق الحبيبات التي تتكون من التجوية الكيميائية للسيليكات .

والمحيطات مثل الرمال السوداء بمصر . وقد تتركز بعض هذه الرواسب بدرجة كبيرة لتكوّن رواسب معدنية ذات قيمة اقتصادية .

٧. التجوية الطبيعية

تكمّل التجوية الطبيعية (الفيزيائية) التجوية الكيميائية ، حيث تدعم إحداها الأخرى . ونبدأ بدراسة دور هذه التجوية في المناطق الجافة ، حيث يتضاءل دور التجوية الكيميائية .

أ. التجوية الطبيعية في المناطق الجافة

تتغطى منكشفات الصخور في المناطق الجافة بعد تجويتها بفترات مفكك يتكون من حبيبات يصل قطرها إلى عدة ملمترات وجليد يزيد قطرها عن المتر . ويعرف هذا التجمع غير المتصلد بالدبش

جدول (2.6): استقرار المعادن الشائعة تحت ظروف التجوية مقارنة بسلسلة بونين التفاعلية

سلسلة بونين التفاعلية Bowen's Reaction Series	معدل التجوية Rate of weathering	استقرار المعادن Stability of Minerals
	أبطأ	أكثر استقراراً
		أكاسيد حديد (هيماتيت)
		هيدروكسيدات ألومنيوم (جيسيت)
		كوارتز
		معادن الصلصال
		ميكا المسكونيت
		فلسبار بوتاسي (أرتوكليز)
		ميكا البايوتيت
		فلسبار غني بالصوديوم (ألبيث)
		أمفيبولات
		بيروكسين
		فلسبار غني بالكالسيوم (أنورتيت)
		أوليفين
		كالسيت
		هاليت
	أسرع	أقل استقراراً
آخر المعادن في التبلور		
كوارتز		
مسكونيت		
بيوتيت		
أففيول		
بيروكسين		
أوليفين		
أول المعادن في التبلور		

جد . العوامل التي تحدد طريقة تكسر الصخور

تتكسر الصخور لأسباب عديدة ، منها الإجهاد (الضغط) على امتداد نطاقات الضعف الطبيعية والنشاط الحيوي (بيولوجي وكيميائي) .

1. نطاقات الضعف الطبيعية

تحتوي الصخور على نطاقات ضعف طبيعية تتكسر الصخور على امتدادها . فالصخور الرسوبية مثل الحجر الرمل والطفل تحتوي على هذه النطاقات ممثلة بمستويات التطبيق المتكونة بين الطبقات المتعاقبة من الرواسب الصلبة . كما تحتوي الصخور المتحولة مثل الإردواز slate على أسطح متوازية من الكسور تسهل انفصالها عبر تلك الأسطح . وتتميز الصخور الجرانيتية ، وبعض الصخور الأخرى بأنها كتلية - أى تتكون من كتل كبيرة لا يظهر عليها أى تغير فى نوع الصخر أو البنية . وتتميز الصخور الكتلية بوجود أسطح تكسر أو انفصال منتظمة ، وعلى مسافات تتراوح بين متر وعدة أمتار ، يطلق عليها فواصل joints ، وهى أسطح تشقق طبيعية فى الصخور لا يصاحبها أى زحزحة على جانبيها . وتتكون الفواصل والكسور غير المنتظمة فى الصخور وهى مازالت مدفونة فى أعماق القشرة الأرضية . وتنتسج هذه الكسور قليلا بسبب عمليات رفع الصخور تدريجيا إلى سطح الأرض وتجوية الصخور التى تغطيها ، مما يؤدي إلى التخلص من وزن الصخور فوقها . وعندما تنتسج تلك الكسور قليلا ، فإن كلا من التجوية الكيميائية والطبيعية تعمل على زيادة اتساع هذه الشقوق .

وهناك نوع من الفواصل يتكون نتيجة زوال الضغط الواقع على الصخور . فعندما تنكشف الصخور الجرانيتية المكونة للبائوليث تدريجيا فوق

ويظهر فى المناطق الجافة بعض علامات التجوية الكيميائية ، مثل وجود الصلصال والفلسبارات المتغيرة ، ولكن الشكل السائد للتجوية فى هذا المناخ هو التجوية الطبيعية . وعلى الرغم من أن التجوية الطبيعية هى التجوية الأكثر شيوعاً فى المناطق الجافة ، إلا أن التجوية الكيميائية تمهد الطريق لتقوم التجوية الطبيعية بهذا الدور . حيث تعمل التغيرات البسيطة فى معدن الفلسبار وغيره من المعادن على إضعاف القوى التى تربط البلورات بعضها ببعض مما يؤدي إلى تكوين شروخ صغيرة ، تنتسج تدريجيا ، ثم تنفصل بلورات الكوارتز أو الفلسبار نتيجة عمل كل من التجوية الطبيعية والكيميائية . وعندما تنتسج هذه الكسور فى الصخور ويزداد حجمها تنفصل كتل كبيرة من المكتشفات .

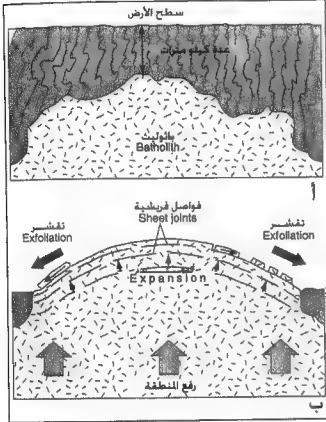
ب. التجوية الطبيعية فى باقى المناطق

تساعد التجوية الكيميائية التجوية الطبيعية فى القيام بدورها . وتقوم التجوية الطبيعية بذلك عندما يتخلل الماء والهواء شقوق وفترات الصخور ، ويتفاعلان مع معادن الصخر مما يؤدي إلى تكسير الصخر إلى قطع أصغر فتعرض مساحة أكبر للتجوية ، وتزيد بذلك سرعة التفاعلات الكيميائية .

ولا تعتمد التجوية الطبيعية دائما على التجوية الكيميائية ، فهناك عمليات تتكسر فيها كتل الصخور التى لم يتم تجويتها ، مثل تمعد الماء فى الكسور . وتؤدي عمليات التكسير الناتجة عن القوى البنائية أثناء عمليات بناء الجبال ، والتى ينتج عنها طى وتكسير الصخور ، إلى جعل هذه الصخور أكثر عرضة للتجوية الطبيعية . ويعمل التكسير الطيعي وحده على تجوية صخور القمر ، حيث يغيب الماء الذى يجعل التجوية الكيميائية ممكنة . وتتكسر الصخور على القمر إلى جلاميد وغبار دقيق نتيجة ارتطام النيازك الكبيرة والصغيرة .

تحدث كسور وتدية بسبب التمدد الناتج عن تجمد الماء. ويعتمد الماء بمقدار 10 ٪ عندما يتجمد . وتحدث هذه الزيادة في الحجم لأن الماء عندما يتجمد فإنه يعيد ترتيب جزيئاته في بنية بلورية مفتوحة ، ويصحب هذا تولد قوى خارجية تكفي لتكسير الصخور حولها . ويحدث التوتد الصقيعي في أعلى الجبال ، حيث توجد

سطح الأرض ، نتيجة إزالة الوزن الكبير الواقع فوقها فيما يعرف بإزالة الحمل unloading فتتمدد الصخور الجرانيتية لأعلى وتتكون كسور تعرف بالفواصل الفريشية (الفواصل السطحية) sheet joints ، وهي عبارة عن أسطح تمتد موازية لسطح الباثوليث (شكل 11.6).



شكل (11.6): فواصل فريشية sheet joints (سطحية) تكونت نتيجة لزوال الضغط

(أ) باثوليث جرانيتي تعرض للرفع الإقليمي مما أدى إلى تعرض الصخور التي تملؤه للتعرية .

(ب) تؤدي إزالة الحمل unloading إلى زوال الضغط

عن الجرانيت وتحدده للخارج ، وتتكون فواصل فريشية (سطحية) متقاربة عند السطح ، مما يؤدي إلى تكون قباب مستديرة .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlson, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

2. نشاط الكائنات الحية

تؤثر الكائنات الحية ، مثل : البكتريا وجذور الأشجار والحيوانات الحفارة للأكل للرواسب ، على كل من التجوية الطبيعية والكيميائية (شكل 12.6) ، حيث تعمل كلها على هدم الصخور وتنشيط التجوية الكيميائية ؛ فالقوى الطبيعية لجذور الأشجار تعمل على توسيع الشقوق والكسور الموجودة في الصخور .

3. التوتد الصقيعي

يعتبر التوتد الصقيعي frost wedging أحد أهم وسائل توسيع الشقوق الموجودة في الصخور ، حيث

دورة يومية للتجمد والتدفئة. وهنا تتعرض قطاعات صخرية للتشقق ، وقد تهوى مكونة أكواما كبيرة مخروطية الشكل أسفل المنحدرات تعرف بالركام talus (شكل 13.6) أو ركام المنحدرات.

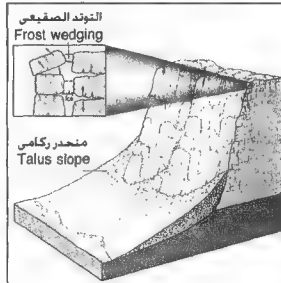
4. تبلور المعدن

بالإضافة إلى العوامل السابقة ، فإننا نلاحظ أنه يمكن أن تولد قوى تمدد أخرى تؤدي إلى تشقق الصخور وانفصالها عندما تبلور المعادن من المحاليل في كسور الشقوق أو على امتداد حدود الحبيبات. وتشيع هذه الظاهرة في المناطق الجافة ، حيث تتبلور المواد

الذائبة الناتجة عن التجوية الكيميائية للصخور عند الملح كبيرة جدا إلى درجة تؤدي إلى تفكيك أو تهشيم تبيخر المحاليل. وقد تكون القوى الناشئة عن بلورات الصخور. وقد تحدث هذه الظاهرة أيضا عندما تنمو



شكل (12.6): تعمل جذور النباتات كإسفين يساعد على زيادة حجم الكسور في الصخور وعلى عملية التجوية الميكانيكية mechanical weathering، صخور الحرائث في وادي غزالة - سيناء - مصر (أ د ممدوح عبد الفتاح حسن، هيئة المواد النووية).



شكل (13.6): التوتد الصقيعي Frost wedging. عندما يتجمد الماء فإنه يتمدد، مما يؤدي إلى تولد قوى تكفي لكسر الصخر. وعندما يحدث التوتد الصقيعي في أعالي الجبال أو على الجروف فإن كسرات الصخر المتشعبة تسقط إلى قاع الجرف، ويتكون تراكب مخروطي الشكل يعرف بالركام talus

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

يسهل نقلها وتعريتها . والخطوات الأولى في عملية التعرية هي انزلاق الكتل الكبيرة وحمل الحبيبات والكسرات الصخرية الصغيرة في مياه الأمطار المناسبة على المنحدرات . وتؤثر شدة الانحدار على كل من التجوية الطبيعية والكيميائية ، وهما يؤثران على التعرية .

وتحول التجوية والتعرية الشديدتان المنحدرات شديدة الانحدار إلى منحدرات لطيفة الانحدار . وتحمل الرياح الحبيبات الصغيرة بينما يقوم جليد المشالج بنقل الكتل الكبيرة المنزوعة من صخور الأساس لمسافات بعيدة .

ويلاحظ ارتباط أحجام المواد المتكونة بالتجوية الطبيعية بمختلف عمليات التعرية . فقد يتغير حجم المواد الناتجة من التجوية مرة أخرى أثناء النقل ، كما قد يتغير تركيبها الكيميائي نتيجة للتجوية الكيميائية . وعند توقف عملية النقل ، يبدأ ترسيب الرواسب المتكونة من التجوية .

V. التربة: راسب متبق من التجوية

إن كل المواد التي تمت تجويتها لا يتم تعريتها وحملها في الحال بعيدا بواسطة المجارى المائية أو عوامل النقل الأخرى ؛ فقد تبقى على المنحدرات المعتدلة أو لطيفة الميل والسهول والأراضي منخفضة التضاريس طبقة تغطي صخر الأساس مكونة من المواد المفككة وغير المتجانسة الناتجة من التجوية . وقد تشمل هذه الطبقة حبيبات من الصخر الأصلي التي تمت تجويتها أو لم يتم تجويتها ، ومعادن الصلصال وأكاسيد الحديد وأكاسيد فلزات أخرى ، ونواتج التجوية الأخرى .

ويطلق المهندسون على كل هذه الطبقة مصطلح "تربة" . ومع ذلك يفضل الجيولوجيون تسمية هذه المادة بالحطام الصخري (الآديسم) regolith ، ويقصرون مصطلح تربة soil على الطبقات العليا من الحطام الصخري ، والتي تحتوي على مواد مفككة مجواة

بلورات الملح أثناء تبخر المياه الجوفية الصاعدة بالخاصية الشعرية وترسب أملاحها الذائبة . وتعتبر كربونات الكالسيوم أكثر هذه المعادن شيوعا ، كما تحتوي على الجبس وملح الطعام .

5. تعاقب الحرارة والبرودة (التمدد الحراري)

تكسر الصخور عندما يتعاقب النهار الحار والليل البارد في المناطق الصحراوية متطرفة المناخ ؛ حيث تنخفض الحرارة من 45°م أو أكثر إلى 15°م خلال ساعة واحدة عند الغروب . وقد يكون سبب تكسر الصخور هو ضعف الصخور بسبب تمددها بالحرارة أثناء النهار وانكماشها بالبرودة أثناء الليل .

6. القوى الأخرى

تعمل الأنهار على شق الأودية عبر صخور الأساس ، باستخدام الصخور المحمولة في الضرب المستمر على صخور المجرى ، ثم الاندفاع بقوة عند مساقط المياه أى الشلالات waterfalls أو في الجنادل rapids (وهي مناطق في مجرى النهر يكون التيار فيها أسرع من غيرها من المناطق ، ويكون سطحها متكسرا ، إلا أن الانحدار لا يكون كافيا لإحداث شلال) . كما يتم تكسير الصخور بتأثر برى وهدم المشالج ، كما سيتم مناقشة ذلك بالتفصيل في الفصل 14 . وبالإضافة إلى ما سبق ، فإن الأمواج التي تضرب الشواطئ الصخرية بقوة تعادل مئات الأطنان على كل متر مربع ، تقوم بتكسير صخور الأساس المنكشفة أيضا .

د. التجوية الطبيعية والتعرية

ترتبط عمليتا التجوية الطبيعية (الفيزيائية) والتعرية ببعضهما البعض ارتباطا وثيقا . كما تؤثر كل منهما في الأخرى تأثيرا كبيرا . حيث تقوم التجوية الطبيعية بتكسير الكتل الكبيرة من الصخور إلى قطع صغيرة

١. قطاع التربة

يستغرق تكوين التربة زمنا طويلا يصل إلى مئات أو آلاف السنين. ويعتمد تكوين التربة على كمية الأمطار المتساقطة ودرجات الحرارة، وأيضا نوع صخر الأساس الذى يجوى ويكون التربة، حيث تزيد درجات الحرارة العالية والرطوبة المرتفعة من سرعة تكوّن التربة. وعندما تنضج التربة تظهر طبقات متميزة من التربة يطلق عليها نطاقات التربة soil horizons. ويطلق على الطبقات أو النطاقات التى تشتملها التربة مصطلح قطاع التربة soil profile (شكل 14.6). وتتميز كل طبقة من هذه الطبقات بخواصها اللونية والتركيب الكيميائى، ويكون الانتقال من أى من هذه النطاقات إلى الآخر غير واضح عادة.

وفىما يلى استعراض لنطاقات التربة الثلاثة:

• نطاق أ (A-horizon) أو النطاق العلوى (نطاق الغسل)

وهو يمثل أعلى طبقة فى قطاع التربة، ولا يزيد سمكها عن متر أو مترين، وتكون أعظم الطبقات لونا، حيث تحتوى على أعلى نسبة من المادة العضوية. وتكون هذه الطبقة العلوية سميكة فى التربة التى امتد تكوينها على مدى زمنى طويل، وتتكون من مكونات غير عضوية معظمها معادن صلصال ومعادن غير قابلة للذوبان مثل الكوارتز. أما المعادن الذائبة فقد غسّلت وأزيلت من هذه التربة.

• نطاق ب (B-horizon) أو النطاق الأوسط (نطاق التراكم)

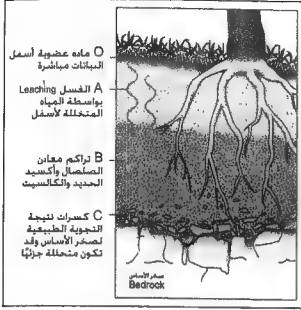
وتكون المادة العضوية فى هذه الطبقة ضئيلة ومتفرقة، بينما تتراكم فيها المعادن الذائبة وأكاسيد الحديد فى هيئة عدسات أو تغلف الحبيبات من الخارج.

فوق صخر الأساس bedrock وتحتوى على المواد العضوية التى تساعد الحياة النباتية وتعصدها. ويمكن بسهولة تعرف الفرق بين الحطام الصخرى والتربة، إذا أخذنا فى الاعتبار الحطام الصخرى فوق سطح القمر. ويتكون الحطام الصخرى فوق سطح القمر من طبقة مفككة من الصخور المكسرة والغبار، إلا أنه تنعدم به الحياة. فقد يحتوى على القليل من المواد العضوية أو قد لا يحتوى عليها على الإطلاق. أما المادة العضوية فى تربة الأرض فهى اللوبال humus وهى بقايا ونفايات النباتات، والحيوانات والبكتريا التى تعيش فيها. ويساهم ركام أوراق النبات بنسبة مهمة فى تربة الغابات.

وتختلف ألوان التربة من الأحمر اللامع والبني، والمميز للتربة الغنية فى الحديد، إلى الأسود والمميز للتربة الغنية فى المواد العضوية. كما تختلف التربة أيضا فى مادتها، فقد تحتل بعض التربة بالخصى والرمل. بينما يتكون بعضها الآخر كلية من الصلصال. ولا تتكون التربة على المنحدرات شديدة الميل نظراً لسهولة تعرية التربة، كما أنها لا تتكون على الارتفاعات العالية بسبب المناخ القارس الذى يمنع نمو النباتات.

ونظراً لأن التربة تمثل جزءاً أساسياً من أجزاء البيئة، كما تلعب دوراً مهماً فى الاقتصاد أيضاً، فقد تطورت دراسة التربة فى القرن العشرين وأصبح لها علم مستقل هو علم التربة (pedology (soil science). ويقوم علماء التربة والمهندسون المدنيون بدراسة تركيب والجيولوجيون والمهندسون المدنيون بدراسة تركيب وأصل التربة، ومدى صلاحيتها للزراعة والإنشاءات وأهميتها فى تعرف الظروف المناخية التى كانت سائدة فى الماضى. وتركز معظم الدراسات الحديثة على الطرق التى يمكن بها مقاومة تعرية التربة soil erosion.

• نطاق ج (C-horizon) أو النطاق السفلي



شكل (14.6): نطاقات التربة (A, B, C) التي تتكون في المناخ الرطب.

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlos, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

الدافئة والرطبة عن تلك المتكونة في المناطق الجافة والمعتدلة. وحيث إن التربة مهمة جداً للزراعة، لذلك فقد تم إعداد خرائط لخصائص التربة في معظم أنحاء العالم. ولقد أدى هذا إلى مستوى تفصيلي من الخرائط لاستخدامها في منع تجوية التربة وتشجيع الزراعة. وعموماً، فإنه يمكن تمييز ثلاث مجموعات رئيسية من التربة على أساس تركيبها المعدني والكيميائي، الذي يمكن مضاهاته بالمناخ (شكل 15.6)، أي إن خصائص كل نوع من التربة تعكس الظروف المناخية السائدة وقت تكوينها.

1. المناخ الرطب: اللايتريت

تكون التجوية سريعة وشديدة في المناخات الدافئة والرطبة، حيث تصبح التربة سميكة. وكلما ارتفعت درجة الحرارة وزادت الرطوبة، كان الغطاء النباتي أكثر انتشاراً وازدهاراً. وتزيد وفرة النباتات والرطوبة

ويتكون من الفتات الصخري الناشئ عن تكسر صخر الأساس، والذي تغير جزئياً واختلط بالصلصال الناتج عن التجوية الكيميائية للصخور.

وتوصف التربة بأنها إما تربة متبقية وإما تربة منقولة. وتنشأ التربة المتبقية **residual soil** من صخر الأساس ولم تنقل من موضع تكوينها، وتشمل النطاقات الثلاث المميزة للتربة. ومعظم التربة تكون من نوع التربة المتبقية. وحين تعمل التجوية بقوة، تتكون التربة بسرعة أكبر، وتصبح أكبر سمكاً. وتحدث معظم التجوية الكيميائية فقط خلال فترات سقوط المطر القصيرة. وتستمر التفاعلات خلال فترات الجفاف ببطء شديد، بسبب وجود بعض الرطوبة المتبقية في التربة. وعندما تجف التربة تماماً بين فترات سقوط الأمطار، فإن التجوية الكيميائية تتوقف تماماً تقريباً.

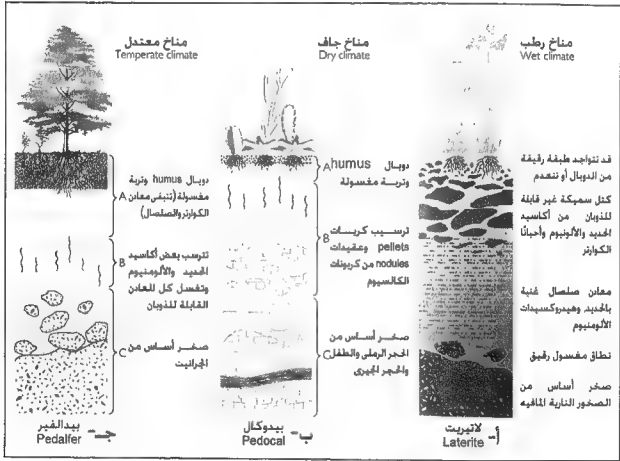
وقد تتراكم التربة المنقولة **transported soil** في بعض المناطق المحدودة من الأراضي المنخفضة، وذلك بعد تعرية تلك التربة من المنحدرات المحيطة وحملها أسفل تلك المنحدرات. والتربة المنقولة شائعة، ويمكن أن تختلط مع الرواسب العادية التي تكونها الأنهار والرياح والجليد. ويمكن تمييز هذه التربة من تركيبها ونسيجها اللذين يكونان أقرب إلى خواص التربة منها للرواسب العادية. وفي بعض الحالات تكون بعض الأجزاء العليا من قطاع التربة الأصلي موجوداً. ويرجع سمك هذه التربة إلى الترسيب أكثر من التجوية المتواجدة في المنطقة المنقولة إليها التربة.

ب. المناخ والزمان وأنواع التربة

يؤثر المناخ بقوة على عملية التجوية، ولذلك فإن له تأثيراً كبيراً على خصائص التربة المتكونة فوق أي صخر. فمثلاً، تختلف خصائص التربة في المناطق

المزدهرة في الغابات الاستوائية، إلا أنها تكون غير منتجة لنباتات المحاصيل بدرجة كبيرة. وتعاد دورة معظم المادة العضوية باستمرار من السطح إلى النباتات، مع وجود طبقة رقيقة جدا من الدوبال على سطح التربة في أحسن الأحوال. ويؤدي التخلص من الأشجار وحرث التربة إلى أكسدة الطبقة السطحية الغنية بالدوبال بسرعة واختفائها، حيث تظهر الطبقة غير الخصبة التي تسفلها.

والمناخ الدافئ من سرعة التجوية الكيميائية بقوة، حيث تُغسل كل المعادن القابلة للذوبان وسهلة التجوية من الطبقة العليا من التربة. ويطلق على الراسب المتبقى من هذه التجوية السريعة مصطلح لاتيريت *laterite*، وهو تربة لونها أحمر داكن حيث تم تغيير الفلسبار والسيليكات الأخرى غاما بينما تبقى معظم أكاسيد وهيدروكسيدات الحديد والألومنيوم (شكل 15.6). وعلى الرغم من أن هذه التربة تساعد الحياة النباتية



شكل (15.6): أنواع التربة الرئيسية:

- (أ) قطاع تربة لاتيريت تكونت فوق صخر ناري مائل (مثل البازلت) في منطقة مدارية.
- (ب) قطاع تربة بيدوكال تكونت فوق صخر أساس وسوي في منطقة جافة (بها أمطار قليلة).
- (ج) قطاع تربة بيدالفير تكونت فوق صخر أساس جرانيتي في منطقة تكون فيها الأمطار متوسطة إلى غزيرة.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

وبين فترات سقوط الأمطار ، فإن الكثير من ماء التربة يسحب إلى قرب السطح ويتبخر ، تاركا عقيدات مترسبة وكرات صغيرة من كربونات الكالسيوم ، غالبا في الطبقة الوسطى من التربة . وتربة البيدوكال لا تكون خصبة مثل تربة البيدالفير ، حيث إن التركيب المعدني والجفاف لا يسمحان بوجود نسبة عالية من الكائنات الحية في التربة . وقد وجد علماء التربة أن الأثرية التي تحملها الرياح يمكن أن تساهم أيضا في تراكم الأملاح في تربة المناطق الجافة ، حيث كونت الكربونات طبقة صلبة غير منفذة في قطاع التربة في منطقة شاسعة جنوب غرب الولايات المتحدة ، تتكون من كربونات الكالسيوم البيضاء المعروفة بالكاليش (قشرة كلسية) caliche .

3. المناخ المعتدل :البيدالفير

تعتمد خصائص التربة في المناطق المعتدلة في سقوط الأمطار ودرجات الحرارة ، كما تعتمد أيضا على المناخ السائد وعلى نوعية الصخر الأصلي وطول المدة اللازمة لتكون التربة وزيادة سمكها . وتقلل التجوية الشديدة وكذلك مدة التعرض من تأثير الصخر الأصلي ، لذلك فقد تختلف كثيرا التربة المتكونة فوق صخر أساس جرانيتي بعد وقت قصير وفي مناخ معتدل الحرارة والرطوبة عن التربة المتكونة على صخر حجر جيري تحت نفس الظروف . فقد تظل تحتفظ التربة المتكونة فوق الجرانيت بقايا من معادن السيليكات ، والتي يغلب عليها معادن الصلصال المتكونة من الفلسبار ، والتي تمثل المكون الرئيسي للصخر الأصلي . أما التربة المتكونة فوق الحجر الجيري فقد تظل تحتفظ بقليل من بقايا كربونات الكالسيوم ، إلا أن معظم فتات الحجر الجيري يذوب بسهولة . أما معادن الصلصال فإنها تمثل أساسا الشوائب الموجودة في الحجر الجيري الأصلي .

ولهذا السبب ، فإن معظم اللاتيريت يزرع لعدة سنوات فقط ، بعد أن ينظف من الأشجار وقبل أن يصبح أرضا قاحلة يجب هجرها . وتوجد الآن مناطق شاسعة في الهند في هذه الحالة . ونظرا لأن أجزاء من غابات الأمازون المطيرة في البرازيل قد أزيلت ، فإنها أصبحت أيضا قاحلة وغير خصبة بعد سنوات قليلة فقط ، حيث يلزم وقت طويل ، ربما يصل إلى آلاف السنين ، لكي يعاد تكوين غابة مرة أخرى على تربة اللاتيريت تحت الظروف الطبيعية .

2. المناخ الجاف :البيدوكال

إن التربة في المناطق الجافة تكون رقيقة ، بسبب نقص المياه وغياب الغطاء النباتي ، مما يعوق التجوية . وفي المناطق الجافة الباردة ، حيث تكون التجوية الكيميائية بطيئة جدا ، فإن تأثير الصخر الأصلي يكون هو العامل السائد ، حتى ولو تم تكوين التربة على مدى زمني طويل . ونتيجة لذلك ، يحتوى النطاق-أ على الكثير من معادن وكسرات الصخر الأصلي التي لم يتم تجويتها . وعندما تكون الأمطار ضئيلة جدا لكي تذيب كميات معقولة من المعادن القابلة للذوبان ، فبقى هذه المعادن في نطاق-أ .

والبيدوكال pedocal هى التربة المنتشرة في المناطق الجافة (شكل 15.6 ب) . وهى نوع من التربة يكون فقيرا في المادة العضوية ، بينما يكون غنيا في الكالسيوم الناتج من كربونات الكالسيوم ، بالإضافة إلى معادن أخرى قابلة للذوبان . وقد اشتق مصطلح البيدوكال من الكلمة اليونانية pedon بمعنى تربة ، بالإضافة إلى الحروف الثلاثة الأولى من كلمة calcite وهو معدن الكاليسيت المكون من كربونات الكالسيوم . وتتواجد البيدوكال في جنوب غرب الولايات المتحدة الأمريكية ومايشبهها من المناطق . وفي مثل هذا المناخ

ج. التربة القديمة : كدليل على المناخ في الأزمنة القديمة لقد تزايد الاهتمام في العصر الحاضر بالتربة القديمة ، والتي حفظت كصخور في السجل الجيولوجي ، ويبلغ عمر بعضها بليون سنة . وتعرف التربة القديمة **paleosol** بأنها تربة تكونت عند سطح الأرض ثم دفنت وحفظت فيما بعد ، ويعتبر سطحها العلوى سطح عدم توافق **unconformity** أى انقطاع مؤقت في الترسيب أو سطح تجوية . ويتم دراسة هذا النوع من التربة للاستدلال على المناخات القديمة ، أو لتحديد نسبة ثنائي أكسيد الكربون والأكسجين في الغلاف الجوى في الأزمنة القديمة . وتستنتج هذه الأدلة من التربة القديمة التى يبلغ عمرها ملايين السنين من خلال دراسة تركيبها المعدنى ، حيث يستدل على عدم وجود أكسدة للتربة في هذه المرحلة المبكرة من تاريخ الأرض ، وبالتالي لم ينطلق الأكسجين ليصبح جزءاً رئيسياً من الغلاف الجوى خلال تلك المرحلة المبكرة من تاريخ الأرض . كما تستخدم التربة القديمة لتقسيم ومضاهاة التتابعات الرسوبية . كما تستخدم أيضاً كأدلة لاستنتاج المعالم التضاريسية ونوع الغطاء النباتى .

VI الرواسب المعدنية المتكونة بالتجوية

قد تؤدي التجوية الكيميائية إلى تكوين رواسب معدنية ذات قيمة اقتصادية نتيجة إزالة المعادن الذائبة وتركيز المعادن الأقل ذوباناً . وفيما يلى استعراض لبعض أهم تلك الرواسب الاقتصادية :

أ. الإثراء الثانوى

تعرف عمليات تجوية الراسب المعدنى كيميائياً والتي تؤدي إلى رفع نسبة المحتوى الفلزى في جزء من الراسب نتيجة إزالة المعادن الذائبة وتركيز الفلزات الأكثر ذوباناً بإثراء الثانوى **secondary**

ومع ذلك ، فإن الفرق بين هاتين الترتين قد يتضاءل أو حتى يختفى بعد عديد من آلاف السنين . وقد تتكون هاتان الترتان من معادن الصلصال نفسها اعتماداً على طبيعة المناخ ، بعد أن فقد كلاهما كل المعادن القابلة للذوبان من الطبقات العليا .

وتسود تربة البيدالفير في المناطق التى تكون فيها الأمطار من متوسطة إلى عالية في شرق الولايات المتحدة الأمريكية ومعظم كندا وأوروبا . وقد اشتق اسم البيدالفير **pedalfir** من الكلمة اليونانية **pedon** وتعنى "تربة" و"al" و"fer" من الرمز الكيميائى للألومنيوم (Al) والحديد (Fe) . وتحتوى الطبقات العليا والمتوسطة من البيدالفير على وفرة من المعادن غير القابلة للذوبان مثل الكوارتز ومعادن الصلصال ونواتج تغير الحديد . أما معادن الكربونات والمعادن الأخرى القابلة للذوبان فإنها تختفى (شكل 15.6 ج) . وتعتبر البيدالفير تربة صالحة للزراعة .

وكما يتضح مما سبق أن تقسيم التربة يتم طبقاً للخواص الفيزيائية والكيميائية بطريقة تشابه كثيراً الطريقة المستخدمة في تقسيم الصخور . ويتم اعتماداً على هذه التصنيفات رسم الخرائط ودراسة وفهم توزيع التربة ، وكذلك العوامل التى ساعدت في تكوينها مما يساعد على الاستخدام الأمثل لهذه التربة . وتصنف التربة الآن في الولايات المتحدة الأمريكية طبقاً لتصنيف قياسى إلى عشر مجموعات ، تحتوى كل مجموعة منها على أقسام يسهل تعرفها . ويلاحظ أن المصطلحات المستخدمة في وصف أقسام التربة إلى لايتريت وبيدالفير وبيدوكال ليست سهلة ، كما أن هذا التصنيف لا يأخذ في الاعتبار الاختلافات في صخور الأساس .

البعض . وعندما تحدث التجوية متفاوتة للصخور فوقالمافية عند سطح الأرض ويتم تعريضها ، ونظرا لمقاومة بلورات الماس للتجوية ، فإنها تبقى ويتم تركيزها في رواسب غنية بالماس عند قمة تلك الأنابيب . وقد تعيد الأنهار توزيع وتركيز الماس ، كما هو الحال في جنوب إفريقيا . وفي كندا ، فإن أنابيب الماس يتم تعريضها بالمثلج حيث يتواجد الماس مبعثرا في رواسب تلك المثلج .

٧٧. الإنسان كعامل من عوامل التجوية

يعتبر الإنسان جزءا من البيئة . فالإنسان هو المسئول عن الأمطار الحمضية ، والتي تنشط عملية التجوية الكيميائية للآثار القديمة بطريقة ملحوظة ، كما تعمل على تجوية المنكشفات الصخرية أيضا ولكن بطريقة غير محسوسة . وحيث إن التجوية الفيزيائية تساعد التجوية الكيميائية ، فإن دور الإنسان يدخل كعنصر مساعد لكلتا العمليتين من خلال عديد من النشاطات التي تؤدي إلى تكسر الصخور أثناء حفر الأساسات وإنشاء الطرق السريعة وعمليات حفر المناجم . ولقد قدر أن نشاط إنشاء الطرق وحده في العالم يسبب تحريك 3000 تريليون طن من الصخور والتربة كل عام .

وقد أظهرت البحوث الحديثة أن التربة يمكن أن تكون مصدرا دائما للتلوث نتيجة اختلاطها بالمواد السامة والتي تؤدي إلى تلوث التربة . وترشح هذه الملوثات ببطء من التربة إلى الأرض والمياه السطحية . كما أضاف الإنسان إلى الأرض أيضا الأملاح والمبيدات ومنتجات البترول ، والتي تؤثر على نمو النباتات ، فتترك التربة عرضة للتأثر السريع بالتعرية . وبذلك يتضح أن الإنسان قد أثر بدرجة ملحوظة على سطح الأرض خلال آلاف السنين من حضارته البشرية ، ولاسيما في القرنين الأخيرين .

enrichment . وقد تكونت بعض الرواسب الاقتصادية المهمة للحديد والمنجنيز والنيكل والنحاس في العالم عن طريق الإثراء الثانوي .

رواسب اللاتيريت : اللاتيريت **laterites** هو مثال لتركيز المعادن بالتجوية . والمواد الأولية في اللاتيريت هي الصخور العادية التي تحتوى على عناصر الحديد والألومنيوم التي يتم تركيزها فيها بعد . والليمونيت هو أحد المعادن قليلة الذوبان المتكونة خلال عملية التجوية الكيميائية . وفي المناخ الحار المطر بغزارة (مناخ استوائي) يتم غسل معظم المعادن ببطء من التربة ، بحيث يتخلف عند السطح قشرة من الليمونيت الغنى بالحديد غير القابل للذوبان . وقد يكون اللاتيريت غنياً بالحديد لدرجة أنه يمكن استغلاله اقتصاديا ، مثل الموجود في غرب إفريقيا .

رواسب البوكسيت : وقد تسبب تجوية السيليكات تكوّن مواد أخرى غير معادن الطين ، مثل البوكسيت **bauxite** وهو خام متكوّن من أكاسيد الألومنيوم المائية . وهو أحد الخامات المهمة لفلز الألومنيوم . ويتكوّن البوكسيت عندما تذاب كل السيليكات (SiO_2) والأيونات الأخرى عدا الألومنيوم الناتجة عن تجوية كل معادن الصلصال الناتجة عن تجوية السيليكات . ويتواجد البوكسيت في المناطق الاستوائية ، حيث يكون المطر غزيرا ودرجة الحرارة عالية والتجوية شديدة .

ب. تركيز الماس

الماس أكثر معدن معروف على الأرض من حيث الصلادة ، وهو أيضاً معدن مقاوم للتجوية للغاية . وترجع صلادته الشديدة إلى الرابطة التساهمية القوية التي تربط ذرات الكربون ، كما أوضحنا في الفصل الثانى . ويتواجد الماس عند سطح الأرض في أنابيب الماس **diamond pipes** ، وهى أعمدة من صخر فوقمافي متكسر ، صعدت من الوشاح العلوى للأرض ، تحتوى على بلورات الماس الموزعة بعيدا عن بعضها

الملخص

الكربونيك . وتتم تجوية الفلسبار البوتاسي $(\text{KAlSi}_3\text{O}_8)$ في وجود هذا الحمض، حيث يذوب البوتاسيوم (K) والسيليكا (SiO_2) في محلول الماء ويتحول الفلسبار إلى معدن صلصال مكونا الكاولينيسيت $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5[\text{OH}]_4$. ويحصل الماء الأيونات الذائبة والسيليكا في الأرض، أو بواسطة المجارى المائية فوق سطح الأرض . ويتم تجوية الحديد (Fe) الموجود كأكسيد حديدوز في عديد من السيليكات بالأكسدة، لتتكون أكاسيد الحديدك . وتذوب الكربونات أثناء عملية التجوية، ولا يترك بعدها أى راسب متبق . وتحدث هذه العمليات عند سرعات مختلفة، لستعكس درجات الثبات الكيميائي للمعادن تحت ظروف التجوية .

7. تؤدي التجوية الطبيعية إلى تكسر الصخور إلى فتات، حيث توجد الكسور إما على امتداد حدود البلورات وإما على امتداد الفواصل في كتل الصخور، وذلك بدعم من التجوية الكيميائية . كما تحدث التجوية الطبيعية أيضا بسبب التوند الصقيعي وتبلور المعادن والحفر والأنفاق التي تحفرها الكائنات الحية وجذور النباتات وتعاقب الحرارة والبرودة، حيث تعمل جميعا على توسعة الكسور والشقوق ؛ مما يؤدي إلى وجود نقاط ضعف عند الحدود الفاصلة بين الحبيبات .

8. تنتج أنساق تجوية مختلفة مثل التقشر والتجوية الكروية من تداخل وتفاعل العمليات الطبيعية والكيميائية .

9. تتكون التربة من خليط من معادن الصلصال وجزئيات الصخور التي تم تجويتها وبعض المواد العضوية، بالإضافة للمسام التي يتخللها الماء والهواء . وتتكون التربة نتيجة تفاعل الكائنات الحية

1. تهدم الصخور عند سطح الأرض بسبب التجوية الكيميائية والفيزيائية . وتحمل نواتج التعرية بعيدا، حيث تمثل المادة الخام لرواسب جديدة .

2. تمتد التجوية إلى أى عمق في القشرة الأرضية يمكن أن يتخلله الماء والهواء، حيث تتخلل المحاليل المائية عبر الفواصل والشقوق في الصخر الأصلي فتؤدي إلى تحللها . وتعمل التجوية الكيميائية والطبيعية معا رغم أن كلا منهما يعمل بطريقة مختلفة تماما .

3. التجوية والتعرية عمليتان مكملتان لدورة الصخور . وتتواجد المعادن الأقل مقاومة للتجوية مدفونة في بيئات القشرة الأرضية، وهي تختلف عن المعادن الموجودة على سطح الأرض .

4. تؤثر طبيعة الصخر الأصلي والتركيب الموجودة به على عملية التجوية لأن المعادن المختلفة المكونة للصخور يتم تجويتها بسرعات مختلفة . ويؤثر المناخ على التجوية، فالمناخ الدافئ والأمطار الغزيرة يزيد من سرعتها، بينما يبطئ المناخ البارد الجاف من سرعتها . كما ينشط التجوية الكيميائية وجود التربة حيث الرطوبة والبيئة الحامضية، بينما تعمل جذور النباتات على تنشيط التجوية الطبيعية . وكلما زادت فترة تعرض الصخر للتجوية، تجوى أكثر، وذلك عند تساوى كل عوامل التجوية .

5. تشمل التجوية الكيميائية عمليات تحول المعادن التي تكونت عند درجات حرارة عالية وضغط مرتفع إلى معادن أخرى تكون مستقرة عند سطح الأرض . وأهم العمليات التي تحدث في التجوية الكيميائية التحلل المائي والغسل والأكسدة والتميز والإذابة .

6. يساعد ثاني أكسيد الكربون الموجود في الماء على تنشيط التجوية الكيميائية، حيث يتكون حامض

الداقثة الجافة ، والبيدالفير (تربة غنية بالحديد والألومنيوم) وتتكون في المناخات المعتدلة.

12. يشمل قطاع التربة ثلاثة نطاقات أ و ب و ج . ويكون النطاق أ غنى بالمادة العضوية ، ويفقد المعادن الذائبة بالغسيل ، ويتراكم الصلصال في نطاق ب مع المواد التي تم غسلها من نطاق - أ ، ويعلو النطاقان - أ و - ب نطاق - ج الذي يتكون من صخر الأساس الذي تم تجويته قليلا .

13. تؤدي التجوية الكيميائية إلى تركيز الرواسب المعدنية المهمة اقتصاديا ، والتي تكون مصادر أولية لمعادن الألومنيوم والنيكل والحديد والمنجنيز والنحاس .

مع الصخور التي تم تجويتها والماء . وحيث إن المناخ ونشاط الكائنات الحية يتحكم في التجوية ، فإن التربة تتكون أسرع في المناخات الدافئة الرطبة عن المناخات الباردة الجافة .

10. تعكس التربة الحديثة تركيب الصخر الأصلي ، بينما تعكس التربة القديمة أساسا المناخ السائد وقت تكوينها ، كما يمكن أن تقدم التربة القديمة دليلا على المعالم الأرضية السابقة والغطاء النباتي ، كما تساعد في عمل تقسيمات ومضاهاة التتابعات الصخرية التي تحتويها .

11. الأنواع الثلاثة الرئيسية للتربة هي : اللاتيريت وتوجد في المناخات الاستوائية الرطبة ، والبيدوكال (تربة كلسية) وتتكون في المناخات

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

<http://www.uoquelpah.ca/~sadura/wearef/weares.htm>

<http://www.prenhall.com/tarback>

<http://www.mnhe.com/earthsci/geology/plummer-old/www.mhtml>

المصطلحات المهمة

A horizon	نطاق - أ	kaolinite	كاولينيت
alteration	تغير	laterite	لاتيريت
B horizon	نطاق - ب	leaching	غسل
bauxite	بوكسيت	mechanical weathering	تجوية ميكانيكية
bedrock	صخر الأساس	oxidation	أكسدة
boulder fields	حقول الجلاميد	mushroom rocks	صخور عيش الغراب أو موائد الشيطان
C horizon	نطاق - ج	paleosol	تربة قديمة
caliche	كاليش (قشرة كلسية)	pedalfer	بيدالفير
carbonic acid	حمض الكربونيك	pedocal	بيدوكال
chemical weathering	تجوية كيميائية	pedology	علم التربة
dehydration	نزع (إزالة) للماء	physical weathering	تجوية طبيعية (فيزيائية)
differential weathering	تجوية متفاوتة (متباينة)	regolith	حطام صخري (أديم)
dissolution	ذوبان (إذابة)	residual soil	تربة متبقية
erosion	تعرية	rubble	دبش (إتلب)
exfoliation	تقشر	secondary enrichment	إثراء ثانوي
frost wedging	توتد صقيعي	soil	تربة
goethite	جوثيت	soil profile	قطاع التربة
hematite	هيماتيت	solubility (mineral)	قابلية الذوبان (لمعدن)
hydration	تحيو	spheroidal weathering	تجوية كروية
hydrolysis	تحلل مائي	talus	ركام
humus	دوبال	transported soil	تربة منقولة
joint	فاصل	weathering rind	لحاء تجوية

الأسئلة

1. ما المعادن التى توجد فى الصخور النارية والتى يتم تحويلها إلى معادن الصلصال؟
9. وضح لماذا تتركز بعض المعادن مثل الذهب والبلاطين فى الرواسب .
2. كيف تؤثر مياه الأمطار الغزيرة على التجوية؟
10. اذكر العوامل الأساسية التى تتحكم فى الأنواع
3. ما الذى يتجوى أسرع الجرانيت أم الحجر الجيرى؟
المختلفة من التربة .
4. ما أوجه الاختلاف بين التجوية الطبيعية والتجوية الكيميائية؟
11. ما الفرق بين الغطاء الصخري والتربة؟
5. كيف تؤثر المناخات على التجوية الكيميائية؟
12. تحتوى التربة فى كل من المنطقة الاستوائية الرطبة والمنطقة القطبية على القليل من المادة العضوية .
6. منكشمان لصخرى الجرانيت والبازلت فى منطقة حارة رطبة . اذكر نوع التجوية التى يمكن أن تسود هل يرجع نقص الدوبال فى المنطقتين إلى الأسباب نفسها؟
7. فى تلك المنطقة ، وأى الصخرين يتم تجويته بمعدل مدفون تحتوى على كاليش عند قمة النطاق - ج ؟
13. ماذا نستنتج عن المناخ الذى تكونت فيه تربة
8. اذكر الطريقة التى تؤثر بها الفواصل على تجوية الصخور .
14. لماذا تعتبر قمة التربة القديمة سطحا لعدم التوافق؟
9. لماذا يكون التوتد الصقيعى أكثر تأثيرا عند درجة صف نطاقات قطاع تربة جيدة التكوين فى غابات دائمة الخضرة ، وأيضا فى منطقة جافة .
15. الحرارة بين نحو -5°م و -15°م؟

الفصل

7

الرواسب والصخور الرسوبية

ا. الصخور الرسوبية ومراحل تكونها :

أ. التجوية والتعرية

1. الرواسب الفتاتية

2. الرواسب الكيميائية والرواسب الكيميائية الحيوية

ب. النقل والترسيب: رحلة إلى مواقع الترسيب :

1. التيارات كعوامل لنقل الحبيبات الفتاتية

2. المثلج كعوامل لنقل الحبيبات الفتاتية

3. السوائل: كوسائل لنقل المواد المذابة

4. المحيطات : خزانات ضخمة للخلط الكيميائي

ج. الدفن وتغيرات ما بعد الترسيب: التحول من راسب

إلى صخر رسوبي :

1. الدفن نتيجة تراكم الرواسب

2. تغيرات ما بعد الترسيب: تحول الراسب إلى صخر

بالحرارة والضغط والتغيرات الكيميائية

اا. الرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية :

أ. شكل الحبيبة

ب. الفرز

ج. تصنيف الرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية :

1. الفتاتيات خشنة التحبيب : الجبرول

والكونجلومرات

2. الفتاتيات متوسطة التحبيب: الرمل والحجر الرمل

3. الفتاتيات دقيقة التحبيب: الغرين وحجر الغرين

والطين والحجر الطيني والطفل

III. الرواسب والصخور الرسوبية الكيميائية والكيميائية

الحيوية :

أ. تصنيف الرواسب والصخور الرسوبية الكيميائية

والكيميائية الحيوية :

1. الرواسب والصخور الرسوبية الكربوناتية : الحجر

الجيري وحجر الدولوميت

2. الرواسب والصخور الرسوبية التبخرية

3. الرواسب السيليكية: مصدر للتشترت

4. تكوين الرواسب بعمليات ما بعد الترسيب:

فوسفوريت

5. رواسب أكسيد الحديد: مصدر لمثكون الحديد

6. المادة العضوية مصدر للفحم والنفط والغاز

IV. التراكيب الرسوبية :

أ. التطبيق

ب. التطبيق المتقاطع

ج. التطبيق المتدرج

د. علامات النيم

هـ. تراكيب التقلب الحيوي (الاضطراب الحيوي)

و. تشققات الطين

ز. التتابعات الطباقية

V. بيئات الترسيب والسحنات الرسوبية :

أ. البيئات القارية

ب. بيئات خط الشاطئ

ج. البيئات البحرية

د. السحنات الرسوبية : تواجد مجموعة من البيئات

الرسوبية مع بعضها بعضا

VI. الترسيب وتكونية الألواح

ويمكن أيضا باستخدام طرق التحليل السابقة استنتاج بيئات الترسيب القديمة مثل خطوط الشواطئ والجبال والسهول والصحارى والمستنقعات . وعند إعادة تصور هذه البيئات، فإنه يمكن رسم خرائط تبين توزيع القارات والمحيطات التى كانت موجودة فى أزمنة سابقة .

وتستخدم الصخور الرسوبية أيضا فى الوصول إلى استنتاجات أخرى ، مثل تكتونية وحركة الألواح السابقة ، وذلك باستخدام أدلة من الصخور الرسوبية الفتاتية التى تعكس نشأة تلك الصخور فى الأقواس البركانية أو وديان الحسف أو الجبال التى تكونت نتيجة تصادم الألواح . وحيث إن مكونات معظم الرواسب والصخور الرسوبية قد نشأت نتيجة تجوية صخور سابقة ، فيمكن استخدامها فى استنتاج المناخ القديم وطبيعة عمليات التجوية القديمة ، كما يمكن أيضا استنتاج تاريخ المحيطات بدراسة الرواسب البحرية .

وتهتم كثير من الدراسات البيئية بالعمليات الرسوبية ؛ لأنها تمدنا بالمعلومات الأساسية لفهم البيئة، حيث إن كل العمليات الرسوبية تحدث على سطح الأرض حيث يعيش الإنسان ، لذلك فهى مهمة لفهم المشاكل البيئية التى تحدث حولنا . وعلى الرغم من أن دراسة الصخور الرسوبية قد بدأت منذ مئات السنين ، إلا أن الدراسات البيئية لم يبدأ الاهتمام بها إلا منذ بداية عام 1960 م .

وترجع أهمية دراسة الرواسب والصخور الرسوبية بالإضافة إلى ما سبق إلى قيمتها الاقتصادية الكبيرة . فتحوى هذه الصخور على النفط والغاز والفحم

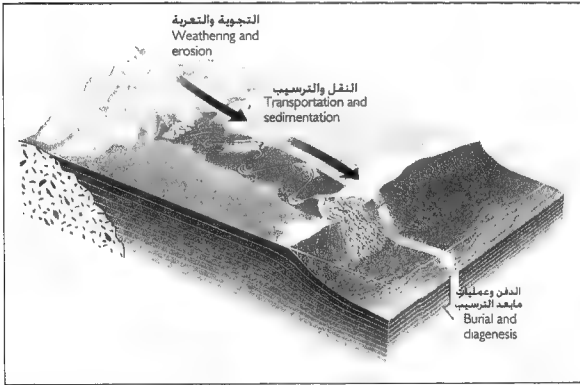
تغطى الرواسب **sediments** والصخور الرسوبية **sedimentary rocks** ما يزيد على 75٪ من سطح القشرة الأرضية . وهى توجد على هيئة طبقات تكونت من حبيبات مفككة من الحطام الصخرى (الأديم) **regolith** ، أو من مواد مذابة نشأت نتيجة تجوية الصخور القارية ثم تم ترسيبها . وتعتبر الرواسب وكذلك الصخور الرسوبية التى نشأت منها سجلا للظروف التى كانت سائدة وقت ترسيبها ، ولذلك فإنها تستخدم فى استنتاج البيئات القديمة والظروف التى كانت سائدة وقت تكوينها ، اعتمادا على محتواها المعدنى والحفرى وأنسجتها والتركيب التى توجد بها ، بالإضافة إلى أماكن الترسيب على سطح الأرض.

فمثلاً يحتوى جبل المقطم فى شرق القاهرة بمصر على طبقات من الحجر الجيرى تتبع حين الإيوسين توجد بها حفريات لكائنات بحرية . ويمكن باستخدام هذه الملاحظات استنتاج أن هذه المنطقة التى ترتفع الآن 160 مترا عن سطح القاهرة كانت قاعا لمحيط فى يوم من الأيام . ويمكن باستخدام حتى حبيبة واحدة من معدن البيروكسين فى رواسب نهر النيل استنتاج الكثير من المعلومات ؛ فقد تكون هذه الحبيبة أصلاً عبارة عن بلورة فى صخر بازلت بمنطقة منابع النيل فى هضبة البحيرات الاستوائية والمرفعات الأنثيوبية ، ثم انفصلت عن بقية المعادن نتيجة تجوية البازلت ، ثم حملها الماء فى مجرى نهر النيل إلى المكان الذى استقرت فيه نهائيا ، حيث انضمت إلى بقية الحبيبات من المصدر نفسه أو من مصادر أخرى لتكوّن طبقة من رواسب الدلتا فى مصر .

وكيفية استخدام تلك الخواص في تعرف أنواع البيئات التي ترسبت فيها . كما سيتضح كيف يعتمد تفسير أصل الرواسب والصخور الرسوبية على مبدأ الوتيرة الواحدة uniformitarianism ، والذي ينص على أن "الحاضر مفتاح الماضي" ، أى يمكن تفسير الأحداث الجيولوجية التي وقعت في الماضي من دراسة الظواهر والأحداث التي تقع في الحاضر . كما سنناقش في هذا الفصل أيضا العلاقة بين عمليات الترسيب وتكتونية الألواح .

ومعظم مصادر الطاقة ذات القيمة مثل اليورانيوم الذي يستخدم في الطاقة النووية . كما أن صخور الفوسفات المستخدمة في التسميد هي صخور رسوبية مثلها مثل كثير من خامات الحديد في العالم ذات الأصل الرسوبي . ويساعد التعرف على كيفية تكون هذه الأنواع من الصخور في استكشاف مصادر اقتصادية إضافية أكثر أهمية .

وسنناقش في هذا الفصل العمليات الجيولوجية التي تؤدي إلى تكوين الرواسب والصخور الرسوبية ،



شكل (1.7): المراحل الرسوبية لدورة الصخور والتي تشمل عددًا من العمليات المتداخلة وهي: التجوية الطبيعية والتجوية الكيميائية والتعرية والنقل والترسيب والدفن؛ حيث ينقل الراسب من الجبال إلى البحر ويعمل الدفن على تحويل الرواسب إلى صخور بعملية ما بعد الترسيب diagenesis ، وتكون على مسار انتقال الراسب من الجبال إلى البحر العديد من بيئات الترسيب .

After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, (New York)

مثل التجوية والنقل والترسيب وتغيرات ما بعد الترسيب (التخلق) . كما سنوضح التركيب المعدني والأنسجة وتراكيب الرواسب والصخور الرسوبية ، 1. الصخور الرسوبية ومراحل تكوينها تمثل الرواسب والصخور الرسوبية التي تتكون منها عناصر مهمة في دورة الصخور . وتقع الصخور

الفواصل ومستويات التطبق في الصخر الأصلي ، بينما تستمد حبيبات الرمل أشكالها من أشكال البلورات المفككة ، التي كانت متداخلة من قبل في الصخر الأصلي .

والرواسب الفتاتية عبارة عن تراكبات من مواد فتاتية ، تحتوى غالبا على معادن سيليكاتية . ويختلف تركيب خليط المعادن المكوّن للراسب الفتاتى ، حيث يحتوى على معدن الكوارتز ذى المقاومة العالية ، بالإضافة إلى بعض المعادن الأقل ثباتا ، والتي تجوّهت جزئياً مثل الفلسبارات والمعادن الأخرى حديثة التكوين مثل معادن الصلصال . كما يؤدى تغير شدة التجوية إلى تكوّن مجموعات مختلفة من المعادن المستمدة من الصخر الأصلي . فعندما تكون التجوية شديدة فإن الراسب يحتوى فقط على حبيبات فتاتية مكوّنة من معادن ثابتة كيميائياً مختلطة مع معادن الصلصال . وعندما تكون التجوية ضعيفة ، فإن عديداً من المعادن غير الثابتة تحت الظروف السطحية تبقى وتواجد في الراسب كحبيبات فتاتية . ويبين جدول (1.7) ثلاث مجموعات مختلفة من المعادن التي يمكن أن تنتج عن تجوية صخر الجرانيت تحت ظروف تجوية مختلفة الشدة .

وفي العادة ، فإن الرواسب الفتاتية تتكون بمعدل أكبر بكثير من الرواسب الكيميائية والرواسب الكيميائية الحيوية . كما تهشم الصخور نتيجة للتجوية الطبيعية بمعدل أكبر من إذابتها بالتجوية الكيميائية . ولذلك ، فإن الرواسب الفتاتية تمثل تقريبا عشرة أضعاف الرواسب الكيميائية والرواسب الكيميائية الحيوية في القشرة الأرضية .

الرسوبية في الجزء السطحي من هذه الدورة ، بين الصخور النارية التي تخرج من الأعماق نتيجة الحركات التكتونية ، والصخور التي تعود إلى أعماق الأرض لتكوّن الصخور المتحولة . ويوضح شكل (1.7) العمليات العديدة المتداخلة التي تمثل مراحل تكوّن الصخور الرسوبية في دورة الصخور ، وهى التجوية والتعرية والنقل والترسيب والدفن وتغيرات ما بعد الترسيب ، وهى التغيرات الطبيعية (الضغط ودرجة الحرارة) والكيميائية (التفاعلات الكيميائية) التي تتعرض لها الرواسب المدفونة فتتحول إلى الصخور الرسوبية .

أ - التجوية والتعرية

تؤدى التجوية الميكانيكية والكيميائية للصخور على سطح الأرض إلى تكوّن المواد الصلبة الفتاتية والذائبة ، ثم تفرم عملية التعرية بحملها بعيدا ، وينتج عن هذه العمليات ثلاثة أنواع مختلفة من الرواسب هى: الرواسب الفتاتية والرواسب الكيميائية والرواسب الكيميائية الحيوية . ونعرض فيما يلى وصفا لكل من هذه الأنواع :

1 - الرواسب الفتاتية

الرواسب الفتاتية **clastic sediments** (وتعرف أيضا بالرواسب الحتاتية **detrital sediments**) عبارة عن فئات صلب نتج عن تجوية صخور سابقة ثم نقل بعوامل طبيعية مثل الهواء أو مياه الأنهار أو المثلج . ويختلف هذا الفتات في الحجم بين جلايمد وحصى وحبيبات رمل وغرين وصلصال ، كما يختلف في الشكل أيضاً ، وتتحدد أشكال الجلايمد والحصى بالكسور الطبيعية التي تتكون على امتداد

جدول (1.7) مجموعات المعادن المكونة لرواسب فتاتية ، وتكونت نتيجة تجوية صخر الجرانيت

تحت ظروف تجوية مختلفة الشدة

شدة التجوية			المعادن المتبقية في الراسب
عالية	متوسطة	منخفضة	
كوارتز معادن صلصال	كوارتز فلسبار ميكا معادن صلصال	كوارتز فلسبار ميكا بيروكسين أمفيبول	

نتيجة لنشاط بعض الكائنات الحية . ويحتوى عديد من طبقات الرواسب الكيميائية الحيوية على حبيبات رسوية ذات أصل عضوى ، مثل: المراجين والطحالب والأصداف الكاملة أو بعض أجزائها ، حيث تختلف أحجام تلك الحبيبات كثيرا . وتعمل الأمواج والتيارات أثناء عملية النقل على قاع البحر على استدارة الحواف الحادة لتلك الحبيبات ، كما قد تتجمع تلك الحبيبات وترسب حسب حجمها لتكوّن طبقات من حبيبات فتاتية حيوية **bioclastic particles** ، يغلب على تركيبها مادة كربونات الكالسيوم في صورة معدن الكالسيت أو الأراجونيت . كما قد تتكون رواسب كربونات الكالسيوم أيضا في أعماق البحار من أصداف أنواع قليلة من الكائنات الحية ، ومعها القليل من الحبيبات الفتاتية الحيوية ، وتكون في هذه الحالة مكونة فقط من كربونات الكالسيوم في صورة معدن الكالسيت. أما في المناطق الضحلة من البحار ، فإن الرواسب تتكون من كربونات الكالسيوم ، في صورتى الكالسيت أو الأراجونيت .

ب - النقل والترسيب: رحلة إلى مواقع الترسيب

تُنقل المواد الفتاتية والأيونات المذابة نتيجة التجوية، وأيضا المواد المكونة كيميائيا أو كيميائيا حيويا إلى مناطق الترسيب ، والتي تكون قريبة عادة . وتقوم عوامل النقل المختلفة بنقل المواد على المنحدرات تحت

2 . الرواسب الكيميائية والرواسب الكيميائية الحيوية تكون نواتج التجوية الكيميائية في معظم الأحيان عبارة عن أيونات أو جزيئات مذابة في ماء التربة أو الأنهار والبحيرات والمحيطات . وترسب هذه المواد المذابة من الماء نتيجة التفاعلات الكيميائية والكيميائية الحيوية ، حيث تتكوّن الرواسب الكيميائية **chemical sediments** . ويتكوّن الراسب الكيميائي نتيجة تفاعلات غير عضوية في الماء . فعندما يبرد الماء الساخن الخارج من ينبوع spring فقد يترسب أوبال (ثاني أكسيد سيليكون) أو كالسيت (كربونات كالسيوم) . وهناك مثال آخر شائع وهو التبخر البسيط لماء البحر أو ماء البحيرات. فعندما يتبخر الماء ، فإن المادة المذابة تتركز وتبدأ الأملاح في الترسيب على هيئة طبقات يكون أكثرها شيوعا تلك المكونة من الجبس أو الهاليت.

كما تتكون الرواسب الكيميائية الحيوية **biochemical sediments** من المعادن المتبقية من الكائنات الحية ، بالإضافة إلى المعادن المكونة نتيجة للتفاعلات الكيميائية الحيوية للنباتات والحيوانات التي تعيش في الماء . فمثلاً ، تستطيع بعض النباتات التى تعيش في البحار أن تقلل من حوضه الماء حولها ، مما يؤدى إلى ترسيب بيكربونات الكالسيوم الذائبة في الماء في شكل كربونات الكالسيوم . كما يتكون الحديد أيضا

وحيث إن معظم المعادن الشائعة في الرواسب يكون لها تقريبا نفس الكثافة (نحو 2.6 إلى 2.9 جم/سم³)، فإننا نستخدم الحجم والذي يسهل قياسه، كمقياس لسرعة ترسيب المعادن المكونة للرواسب.

فعندما تقل سرعة التيار الحامل للمواد الفتاتية مختلفة الأحجام، تبدأ الحبيبات الأكبر حجما في الترسيب، ويتوالى ترسيب المواد الأقل حجما كلما قلت سرعة التيار. وتعرف عملية تجميع الرواسب في مجموعات طبقا لحجمها، بحيث تشابه حبيبات كل مجموعة منها في الحجم، بعملية الفرز sorting. وسنناقش عملية الفرز لاحقا عند شرح الرواسب الفتاتية.

2. المالح كموال لنقل الحبيبات الفتاتية

تحمل المالح glaciers أيضاً الحبيبات الفتاتية. وعندما تتحرك أنهار الجليد على المنحدرات نحو سفوح التلال نتيجة الجاذبية الأرضية، فإنها تجرف معها كميات كبيرة من الفتات الصخري والحبيبات الصلبة التي تم تعريضها من التربة وصخر الأساس bedrock، وتكون تلك الحبيبات خليطا غير متجانس الحجم (ردىء الفرز)، حيث إنها لا يمكن أن ترسب وتفرز في وسط الجليد الصلب. ولكن عندما تذوب الثلجة، فإنها ترسب كمية كبيرة من الحطام والحبيبات الفتاتية، والتي تندرج في الحجم من الحصى إلى الصلصال عند حافة الجليد المنصهر. وتحمل أنهار الماء المنصهر الحطام بعيدا ويصبح عرضة لعملية الفرز التي تطبق على الحبيبات الفتاتية الأخرى.

ويسبب النقل بالمالح ضغط الحبيبات مع بعضها البعض ببطء واصطدامها وتكسرها، مما يؤدي إلى أن تصبح الحبيبات أصغر حجما ولكنها ليست مستديرة. كما تسبب المالح تفتت صخر الأساس عند قاع وحواف الثلجة.

تأثير قوة الجاذبية الأرضية. فالصخور الساقطة من الجرف، والرمال المحمولة بواسطة الأنهار وتجري نحو البحر، وجليد المالح الذي يجرف فتات الصخور ببطء على المنحدرات تكون كلها استجابة للجاذبية الأرضية. وعلى الرغم من أن الرياح ربما تذررو المواد من الصخور المنخفضة إلى المرتفعات، فإن الجاذبية على المدى البعيد هي العامل الأكثر تأثيرا، فالرمال والأتربة ترسب استجابة لتأثير الجاذبية الأرضية. وبمجرد أن تسقط الحبيبات إلى المحيط وترسب خلال الماء، فعندها تكون كما لو كانت دخلت في شرك أو فخ. ويمكن أن تنقل هذه الرواسب مرة أخرى إلى موقع ترسيب جديد على قاع المحيط.

1. التيارات كموال لنقل الحبيبات الفتاتية

تُنقل معظم الرواسب الفتاتية بواسطة تيارات الماء أو الهواء. وتعمل تيارات الماء في الأنهار على نقل كميات هائلة من الرواسب إلى المحيطات، والتي تصل سنويا إلى نحو 25 بليون طن من الرواسب الصلبة والذائبة. كما تحمل تيارات الهواء المواد أيضا، ولكن بكميات أقل بكثير من تيارات الأنهار والمحيطات. وبمجرد أن تترك الحبيبات في الهواء أو الماء، فإن التيار يحملها عبر الأنهار أو بالرياح. وكلما كان التيار أقوى - بمعنى أنه أسرع انسيابا - كان حجم الحبيبات المنقولة أكبر.

وتبدأ عملية الترسيب sedimentation للمواد الفتاتية بعد توقف عملية نقل الرواسب. وتلعب الجاذبية الأرضية الدور الحاسم عند ترسيب المواد الفتاتية. وعلى الرغم من أن كل الحبيبات تسقط على الأرض بنفس السرعة بصرف النظر عن حجمها حسب قوانين الفيزياء، إلا أن الحبيبات الكبيرة ترسب بمعدل أسرع من الحبيبات الصغيرة، حيث تتناسب سرعة الترسيب طرديا مع كثافة الحبيبة وحجمها.

3. السوائل : كوسائل لنقل المواد المذابة

salinity المحيطات ثابتة ، أى تبقى الكمية الكلية للمواد المذابة في حجم معين من ماء البحر ثابتة . وتعادل بذلك كمية المواد المترسبة على قيعان المحيطات مع كمية المواد الذائبة التى تنساب إليها نتيجة تجوية صخور القارات وكذلك النشاط الحرماي عند حيود وسط المحيط .

ويمكن تعرف بعض العمليات التى تحافظ على هذا الاتزان الكيميائي في المحيطات من متابعة عنصر الكالسيوم ، الذى يعتبر المكون الأساسى لمادة كربونات الكالسيوم (CaCO_3) التى تكوّن معظم الرواسب الكيميائية الحيوية المنتشرة في المحيطات . ويذاب الكالسيوم عندما تتعرض صخور الحجر الجيري ومعادن السيليكات التى تحتوى على الكالسيوم (مثل الفلسبارات والبروكسينات) للتجوية على سطح الأرض ، حيث يُنقل الكالسيوم كأيونات كالسيوم (Ca^{2+}) إلى المحيطات . وتقوم الكائنات الحية البحرية بالعمل على اتحاد أيونات الكالسيوم مع أيونات البيكربونات (HCO_3^-) الذائبة في مياه البحار لتكوّن أصدافها ، وحينما تموت الكائنات الحية وتستقر أصدافها وتتراكم على هيئة رواسب مكوّنة من كربونات الكالسيوم على قاع المحيط ، فإنها تتحول نهائيا عند تعرضها لعمليات ما بعد الترسيب إلى الحجر الجيري ، وبذلك يترك الكالسيوم مياه المحيط الذى دخله كأيونات ذائبة . وهكذا تلعب الكائنات الحية دورا مهما في المحافظة على ثبات نسبة الكالسيوم المذاب في المحيط .

وتساعد العمليات غير العضوية أيضا على التوازن الكيميائي في مياه المحيطات . حيث تتفاعل أيونات الصوديوم (Na^+) المنقولة إلى المحيطات مع أيونات الكلوريد (Cl^-) ليرسب كلوريد الصوديوم (NaCl) في صورة معدن الهاليت ، حينما يعمل البحر على زيادة

تلعب التفاعلات الكيميائية دورا أكبر من الدور الذى تلعبه الجاذبية الأرضية في عمليات النقل والترسيب الكيميائي والكيميائي الحيوي . ويتم نقل المواد الكيميائية الذائبة بالتجوية مع الماء الحاوى لها في شكل محلول متجانس ، حيث تكون المواد الذائبة (مثل أيونات الكالسيوم) جزءا من محلول الماء نفسه ، الذى ينساب عبر الأنهار إلى البحيرات والمحيطات .

4. المحيطات : خزانات ضخمة للمخلوط الكيميائي

يعتبر المحيط خزانا ضخما للمخلوط الكيميائي ، حيث تحمل الأنهار والأمطار والرياح والمخاليج المواد المذابة إلى المحيط باستمرار . كما تدخل المحيط أيضا كميات صغيرة من المواد المذابة نتيجة التفاعلات الكيميائية الحرماية بين مياه البحر والبازلت الساخن في حيود وسط المحيط . وتقوم التيارات والأمواج بخلط هذه المواد مع مياه المحيط . ويتبخر ماء المحيط باستمرار عند السطح . وتعادل كمية المياه التى تنساب إلى المحيط تلك التى يفقدها خلال عملية التبخر ، بحيث تبقى كمية المياه في المحيطات ثابتة خلال الفترات الجيولوجية القصيرة مثل السنوات والعقود أو حتى القرون ، بينما قد يتغير هذا التوازن خلال الفترات الزمنية الأطول كملايين السنين . كما يتوازن دخول وخروج المواد المذابة أيضا . وتشارك كل المواد الذائبة في ماء البحر في التفاعلات الكيميائية والكيميائية الحيوية ، والتى تؤدي إلى ترسيبها على قاع البحر ؛ فقد ترسب كميات صغيرة من المواد الكيميائية المنقولة بالمجاري المائية في البحيرات المالحة أو البحيرات القلوية ، بينما ترسب كميات ضخمة في البحار المالحة المجاورة ، وهى بيئة مختلفة تماما عن بيئة المياه العذبة في الأنهار . وترتب على ترسيب المواد الذائبة في مياه المحيطات في صورة رواسب كيميائية أو كيميائية حيوية ، أن تبقى ملوحة

موقع ترسيبي جديد على قاع المحيط . أما الرواسب التي استقرت على القارات ، فإن نسبة كبيرة منها قد تترسب في بيئات نهريّة (طميية) وبحريّة ضحلة العمق، وقد تدفن لتكوّن الصخور الرسوبية ، أو قد يكون قد سبق دفنها عميقاً في القشرة القارية. ولكن كيف يؤدي الترسيب إلى الدفن؟

1- الدفن نتيجة تراكم الرواسب

يؤدي استمرار الترسيب في البيئات المختلفة إلى تراكم كميات ضخمة من الرواسب التي تتميز بسحنات مختلفة . ويحدث تراكم الرواسب جزئياً نتيجة لهبوط **subsidence** القشرة بلطف في منطقة ما بالنسبة للمناطق المحيطة بها . وينشأ الهبوط إما بسبب إضافة كميات من الرواسب تضغط على القشرة، وإما لأسباب تكتونية مثل الصدوع الإقليميّة أو لكليهما. وأحواض الترسيب **sedimentary basins** عبارة عن مناطق تغطي مساحات كبيرة (على الأقل 10000 كم²) ، ترسبت فيها تراكبات سميكة من الرواسب والصخور الرسوبية . وتأخذ تراكبات السحنات المختلفة الموجودة في تلك الأحواض أشكالاً هندسية ، تتراوح من قيعان ضيقة إلى منخفضات دائرية أو بيضاوية تشبه الملعقة . وتتواجد معظم الصخور الرسوبية في العالم في هذه الأحواض ، والتي قد تصبح عبارة عن خزانات لمعظم تجمعات النفط والغاز . وتخضع ميكانيكية هبوط الأحواض وتراكم الرواسب بها لكثير من الأبحاث حالياً .

2. تغيرات ما بعد الترسيب: تحول الراسب إلى صخر بالحرارة والضغط والتغيرات الكيميائية

تتعرض الرواسب بعد عمليتي الترسيب والدفن إلى تغيرات ما بعد الترسيب . وتعرف عمليات ما بعد الترسيب **diagenesis** بأنها التغيرات الكيميائية

نسبة أيونات الصوديوم والكلوريد في الماء لتصل إلى درجة فوق التشبع . وكما أوضحنا في الفصل الثاني، فإن المعادن تتبلور من المحاليل فوق المشبعة عندما يخترق المحلول على كمية كبيرة من المادة المذابة والتي تتفاعل تلقائياً لتكوّن الرواسب . ويحدث البحر الشديد اللازم لحدوث التبلور في المياه الدافئة ، والتي توجد في أذرع البحار الضحلة .

والترسيب العضوي هو نوع آخر من الترسيب الكيميائي الحيوي . فعندما تُحفظ النباتات من التحلل بعد أن تتراكم في المستنقعات كمادة غنية بالمادة العضوية فإنها تكوّن الخث (بيت) **peat** الذي يخترق على أكثر من 50 في المائة كربون . وعندما يدفن الخث نهائياً فإنه يتحول نتيجة عمليات ما بعد الترسيب إلى الفحم **coal** . وتتراكم أيضاً بقايا الطحالب والبكتريا وبعض الكائنات الحية الدقيقة الأخرى كمادة عضوية في الرواسب الموجودة في مياه البحيرات والمحيطات ، وتحول لاحقاً إلى نفط وغاز .

ج - الدفن وتغيرات ما بعد الترسيب: التحول من راسب إلى صخر رسوبي

تحمل الأنهار والرياح والمخاليج الجزء الأكبر من الرواسب الفتاتية الناشئة عن تجوية وتعرية سطح اليابسة إلى قاع المحيط ، بينما يتبقى القليل منها على اليابسة . كما يحدث الشيء نفسه للرواسب الكيميائية والكيميائية الحيوية ، حيث يترسب الجزء الأكبر منها على قاع المحيط أيضاً ، بينما يترسب القليل منها في البحيرات والمستنقعات . وبالمقارنة بالرواسب التي ترسبت على اليابسة ، فإن نسبة أكبر من الرواسب المترامية على قاع المحيط تدفن وتحفظ لوقت طويل . وتهبط الرواسب الحيوية والكيميائية في مياه المحيط ، حيث يتم اصطيادها بواسطة تيارات المحيط وتنقل إلى

والفيزيائية التي تحدث في الرواسب المدفونة مثل التصخر lithification والكبس compaction ، والتي تؤدي إلى تحول الراسب إلى صخر رسوبي . وهذه التغيرات تحدث بعد الترسيب وقبل عملية التحول التي تؤثر في الراسب وتحوله من مادة رسوبية إلى صخر متحول بالحرارة والضغط . ولا تشمل عمليات ما بعد الترسيب عملية التجوية . ويعمل الدفن على زيادة هذه التغيرات ، حيث إن الرواسب المدفونة تكون عرضة لدرجات الحرارة والضغط المتزايدة في باطن الأرض . ويوضح شكل (2.7) تغيرات ما بعد الترسيب .

وتتزايد درجة حرارة الأرض مع العمق ، ولكن بمعدلات تتغير طبقاً لطبقات الأرض الداخلية (ويسمى معدل تزايد درجة الحرارة مع العمق "منحنى حرارة الأرض geotherm أو تدرج حرارة الأرض "geothermal gradient" . ويتواجد أسرع معدل لتزايد درجة الحرارة في القشرة الأرضية حيث ترتفع درجة الحرارة بمعدل 30°م لكل كيلو متر عمقا . فعند عمق 4 كم تقريبا ، قد تصل حرارة الرواسب المدفونة إلى نحو 120°م أو أكثر . ويحدث العديد من التفاعلات الكيميائية بين المعادن والماء المتواجد في مسام الصخور الرسوبية ، وخصوصا عند درجات الحرارة المرتفعة هذه . والعامل الثاني المسبب لتغيرات ما بعد الترسيب هو زيادة الضغط مع العمق ، والذي يقدر بحوالي 1 ضغط جوي لكل 4.4 م في العمق في المتوسط ، وهذا الضغط هو المستول عن كبس أو دمج الرواسب .

وحينما ترتفع درجة الحرارة ، فإن تغيرات ما بعد الترسيب تدخل في نطاق عمليات التحول ، حيث تتراوح درجة الحرارة بين نحو 300°م و 350°م ، وهي تقابل نحو 10-12 كم عمقا .

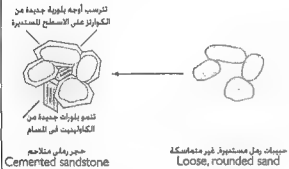
تشمل عمليات التصخر Lithification عدة عمليات موصحة فيما يلي:

Mudstone and shale	طين	Mud	حجر الطين والطين
Sandstone	رمل	Sand	حجر رمل
Conglomerate	حجر	Gravel	كوتلوميرات
Limestone and dolomite	طين جيري ، رمال ، رواسب طينية	Lime muds, sands, oozes	حجر جير ، حجر الدولوميت

(أ) الكبس (الطين أساسا)



(ب) ترسيب معادن جديدة أو إضافات إلى المعادن الموجودة



(ج) إذابة المعادن الأكثر قابلية للذوبان



(د) إعادة تبلور المعادن غير المستقرة



شكل (2.7): تؤدي عمليات ما بعد الترسيب diagenesis إلى حدوث تغيرات في التركيب والنسيج . وتؤدي معظم هذه التغيرات إلى تحول راسب غير متماثل إلى صخر رسوبي متماثل . (After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

كما يمثل التغير الكيميائي لمعادن الصلصال clay minerals ، والتي ترسبت أصلاً كحبيبات فتاتية ، مثالاً آخر على تغير كيميائي يحدث بعد الترسيب في الرواسب والصخور الفتاتية ، حيث يتحول معدن الكاولينيت kaolinite إلى معدن الاليت illite ، وهو معدن صلصال مشابه لمعدن المسكوفيت ، وهو أحد معادن مجموعة الميكا .

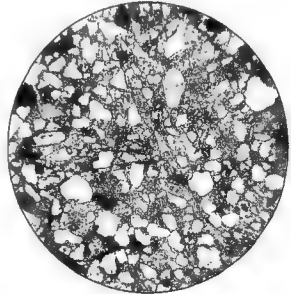
التغير الفيزيائي: الكبس

تمثل عملية الكبس (الاندماج) compaction التغير الفيزيائي الأساسي في مرحلة ما بعد الترسيب ، ويؤدي إلى نقص في حجم ومسامية الرواسب والصخور الرسوبية ، وتحدث هذه العملية عادة عندما تُكبس الحبيبات لتتقرب من بعضها بعضاً نتيجة لزيادة وزن الرواسب التي تعلوها . ويتم تعبئة packing الرمال جيداً أثناء الترسيب ، ولذلك فإنها لا تتعرض كثيراً للكبس . أما الطين mud المترسب حديثاً فتكون مساميته عالية ، حيث تصل نسبة الماء في مسامه أكثر من 60٪ . ولذلك ، يُكبس الطين بدرجة كبيرة بعد الدفن حيث يفقد أكثر من 50٪ من الماء الموجود به .

إعادة التبلور قد يعاد تبلور المعادن الأقل استقراراً إلى أشكال أكثر استقراراً . وتعرف هذه العملية بإعادة التبلور recrystallization . فمعدن الأراجونيت هو الشكل الأقل استقراراً لكربونات الكالسيوم ، كما أنه المكون الرئيسي للعديد من الأصداف التي تكون الرواسب الكربوناتية . وأثناء عمليات تغيرات ما بعد الترسيب ، وبعد بداية الدفن مباشرة ، يبدأ الأراجونيت في إعادة التبلور إلى شكل من كربونات الكالسيوم أكثر استقراراً ، وهو معدن الكالسيت ، وهو أكثر معادن الحجر الجيري شيوعاً .

التغير الكيميائي: التلاحم

التلاحم cementation هو عملية تغير كيميائي رئيسية تحدث بعد الترسيب ، حيث ترسب أثناءها معادن في المسام بين حبيبات الراسب أو الصخر الرسوبي مكونة مادة لاصقة تربط بين هذه الحبيبات . وينتج عن التلاحم نقص في المسامية porosity (النسبة المئوية لحجم المسام إلى الحجم الكلي للصخر) . كما يؤدي التلاحم أيضاً إلى التصخر lithification وهو إحدى عمليات ما بعد الترسيب ، والتي يتصلد خلالها الراسب غير المتناسك إلى صخر صلد . فمثلاً ، قد يترسب كربونات الكالسيوم على هيئة معدن كالسيت في بعض الرمال ، حيث يعمل الكالسيت كمادة لاصقة تربط الحبيبات وتسبب تصلد الكتلة الناتجة إلى حجر رملي (شكل 3.7) . وقد تقوم بعملية التلاحم معادن أخرى مثل الكوارتز ، الذي يلحم حبيبات الرمل والطين والحصى ليحولها إلى حجر رملي وحجر طيني وكونجلومرات أو بريشيا .



شكل (3.7): حجر رملي حيث يترسب معدن الكالسيت كمادة لاصقة تربط حبيبات الكوارتز وتسبب تصلد الصخر . وسط الصحراء الشرقية - مصر .

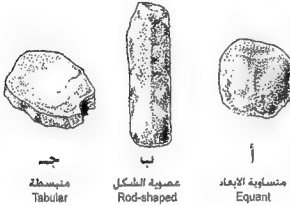
II. الرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية

تؤدي عملية نقل الفتات إلى تقليص الحبيبات واصطدامها ببعضها ببعض، أو احتكاكها بصخور الأساس فيحدث سحج abrasion للحبيبات، تصبح أكثر استدارة كلما زادت مسافة النقل.

تصنف الرواسب وكذلك الصخور الرسوبية إلى قسمين رئيسيين: أولها الرواسب الفتاتية، وثانيها الرواسب الكيائية والكيميائية الحيوية. ويمثل القسم الأول والذي يشمل الطين والطفل والرمل والحجر الرمل والجزل والكونجلومرات أكثر من ثلاثة أرباع الصخور الرسوبية المكونة للقشرة الأرضية، ولذلك سيتم تناولها أولاً.

1. شكل الحبيبة

يوصف شكل الحبيبة أثناء دراسة الرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية بثلاث صفات هي الشكل والتكور والاستدارة. ويوصف الشكل العام form للحبيبة بأنه متساوي الأبعاد equant عندما تكون أبعاد الحبيبة متساوية في كل الاتجاهات، كما توصف بأنها منبسطة (نضيدية) tabular عندما يكون هناك بعدان أكبر من البعد الثالث، أو تأخذ شكل العصا rod-shaped (شكل 4.7)، عندما يكون بعد واحد أكبر من البعدين الآخرين. أما التكور sphericity فهو مقياس لدرجة اقتراب شكل الحبيبة العام من شكل الكرة. وتوصف الحبيبة بأنها عالية التكور كلما كانت أقرب إلى شكل الكرة، بينما توصف الحبيبات المنبسطة، وتلك التي تشبه العصا بأنها منخفضة التكور. أما الاستدارة roundness فهي مقياس لدرجة حدة حواف الحبيبة. وتوصف الحبيبات التي حوافها حادة بأنها بالغة التزوي very angular، بينما توصف الحبيبات التي تكون حوافها ناعمة ومستديرة بأنها جيدة الاستدارة well-rounded. ويؤدي استمرار عمليات التجوية الطبيعية لفترات زمنية طويلة، وكذلك نقل الحبيبات بتيارات المياه والرياح إلى تصغير حجم الحبيبات، كما يؤدي إلى استدارة الفتات الرسوبي ذي الحواف الحادة (شكل 5.7)؛ حيث



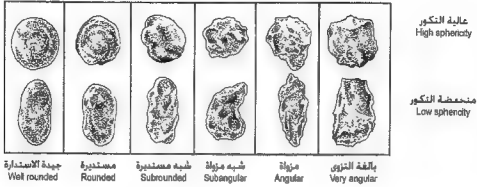
شكل (4.7): أشكال الحبيبات الرسوبية

(1) متساوية الأبعاد (ب) عصوية الشكل (ج) منبسطة.

(After Raymond, L.A., 1995: Petrology: The study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic rocks. Wm. C. Brown Publishers).

ب. الفرز

يعكس تصنيف الرواسب والصخور الفتاتية المختلفة على أساس أحجام الحبيبات ظروف ترسيب تلك الرواسب. وكما أوضحنا سابقاً، فكلما كان حجم الحبيبات أكبر، كان التيار المطلوب للنقل والترسيب أقوى. ويؤدي هذا السلازم بين قوة التيار وحجم الحبيبات إلى فرز الحبيبات وترسيبها في طبقات مفروزة. ولذلك، فإن معظم طبقات الرمل لا تحتوي على حصي أو طين، كما تتكون معظم طبقات الطين من الحبيبات الدقيقة فقط. وتعرف عملية تجميع الرواسب في مجموعات طبقاً لحجم حبيباتها بعملية الفرز sorting، حيث يكون الراسب جيد الفرز إذا كان مكوناً في معظمه من حبيبات متجانسة الحجم غالباً،



شكل (6.7): استدارة roundness وتزوي angularity الحبيبات منخفضة وعالية التكور.

(After Raymond, L.A., 1995: Petrology: The study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic rocks. Wm. C. Brown Publishers).

الصخرى إلى مجموعات أصغر، بناءً على التركيب المعدني الذي يعكس مكونات الصخور الأصلية. ولذلك فهناك حجر رملي غني بالكوارتز وحجر رملي غني بالفلسبار وصخور طفلة حيرية وأخرى سيليسية

بينما يكون الراسب رديء الفرز إذا كان مكوّنًا من حبيبات مختلفة الحجم (شكل 6.7).

ويمكن تقسيم كل مجموعة من المجموعات الحجمية السابقة والمصنفة على أساس النسيج

شكل (6.7): درجة فرز sorting الحبيبات، وهو تصنيف الرواسب في مجموعات طبقاً لحجمها. فيكون الراسب جيد الفرز من حبيبات متقاربة الحجم، بينما يتكون الراسب رديء الفرز من حبيبات مختلفة الأحجام.

(After Raymond, L.A., 1995: Petrology: The study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic rocks. Wm. C. Brown Publishers).

ج. تصنيف الرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية

تصنف الرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية **clastic sediments and sedimentary rocks** بناءً على حجم الحبيبات إلى ثلاث مجموعات رئيسية (جدول 2.7) كالتالي .

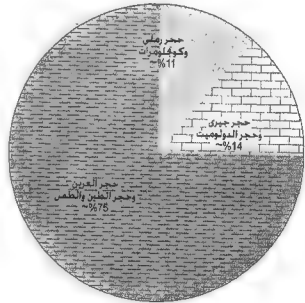
- خشة الحبيبات ، وتشمل الجبرول gravel والكونجلومرات conglomerate والبريشيا breccia .
- متوسطة الحبيبات ، وتشمل الرمل sand والحجر الرمي sandstone .
- دقيقة الحبيبات ، وتشمل الغرين silt وحجر الغرين siltstone والطين mud والطين shale والصلصال clay وحجر الصلصال claystone .

وستناقش فيما يلي الخصائص المميزة لكل من هذه المجموعات الثلاث للرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية بشيء من التفصيل:

1. الفتاتيات خشة التحجب: الجبرول والكونجلومرات يعتبر الجبرول من أحشن الرواسب الفتاتية ، حيث يتكون من حبيبات يزيد قطرها على 2 مم ، ويشمل: الجبرول ورواسب الجلاميد boulders والحصى الكبير cobbles والحصى pebbles (جدول 2.7) . والجبرول هو المقابل المفكك لصخر الكونجلومرات conglomerate والبريشيا breccia ، أي أن الكونجلومرات عبارة عن جبرول تماسكت حبيباته وتصلدت (شكل 8.7 أ) . وتختلف الكونجلومرات عن البريشيا في كون حبيباتها أكثر استدارة (شكل 8.7 ب) . ونظرا لكبر حجم الحبيبات في تلك الصخور ، فإنه يسهل دراستها وتعريفها . حيث يشير مثلا وجود حصى جرانيتي في كونجلومرات ترسب بنشاط الأنهار، إلى وجود كتلة من الجرانيت متكشفة في مناطق الصرف drainage areas التي تغذى الأنهار التي قامت بنقل الجبرول .

أو غنية بالمواد العضوية . وبعض الرواسب تكون فتاتية عضوية ، حيث تتكون من مواد مثل الكربونات ترسبت أصلاً على هيئة أصداف ولكن كسرت ونقلت بالتيار نقلا ميكانيكيا .

ويعتبر الغرين وحجر الغرين والطين والحجر الطيني والطفل من أكثر أنواع الرواسب الفتاتية انتشارا، حيث تمثل نحو ثلاثة أضعاف الصخور الفتاتية الخشنة الحبيبات (شكل 7.7) . ويعكس انتشار الفتاتيات دقيقة التحجب والتي تحتوي على كميات كبيرة من معادن الصلصال ، أهمية الدور الذي تلعبه التجوية الكيميائية لكميات كبيرة من الفلسبار والمعادن السيليكاتية الأخرى لتكوين معادن الصلصال في القشرة الأرضية .



شكل (7.7): الانتشار النسبي لأنواع الصخور الرسوبية الرئيسية . نتواجد أنواع الصخور الرسوبية الأخرى ، والتي تشمل المتبخرات والتشترت والرواسب الكيميائية الأخرى بكميات ضئيلة . بينما تمثل الصخور الفتاتية أكثر من ثلاثة أرباع الصخور الرسوبية الموجودة في القشرة الأرضية .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

جدول (2.7): المجموعات الرئيسية للرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية

الصخور Rock	الراسب Sediment	حجم الحبيبات Particle size	
بريشيا breccia وكونجلومرات conglomerate	gravel حصى	أكبر من 256 مم	خشنة
		زلط 64-256 مم	
		حصى 2-64 مم	
حجر رملي sandstone	sand رمل	2-0.062 مم	متوسطة
حجر الغرين siltstone	mud طين	silt غرين	ناعمة
حجر الطين mudstone (تشقق كتل)		صلصال clay	
الطين shale (رقائق موازية لأسطح الطباقية)		أقل من 0.0039 مم	
حجر الصلصال c.aystone			

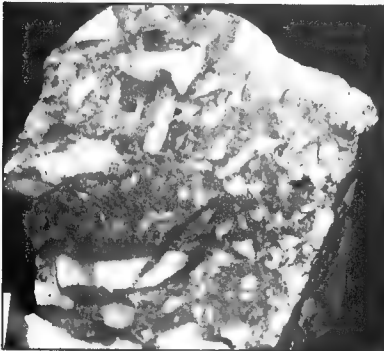
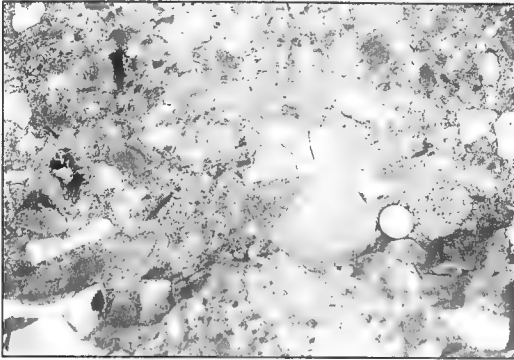
بعض البريشيا بسبب تكسر مواد بركانية عند الانفجارات البركانية (بريشيا بركانية) أو قد تتكون البريشيا بسبب تكسير الصخور على امتداد أسطح الصدوع (بريشيا الصدوع).

2 - الفتاتيات متوسطة التحبب: الرمل والحجر الرملي

يتكون الرمل sand من حبيبات متوسطة الحجم يتراوح قطرها بين 0.062 إلى 2 مم (جدول 2.7). وتتحرك هذه الرواسب بفعل تيارات متوسطة القوة مثل تلك الموجودة بالأهوار وبيئات خط الشاطئ والرياح التي تذر الرمال في الكثبان الرملية. وتكون حبيبات الرمل كبيرة بدرجة تسمح برؤيتها بالعين المجردة، كما يمكن رؤية عديد من الملامح المميزة لحبيبات الرمل، باستخدام عدسة مكبرة ذات قوة تكبير صغيرة.

والمقابل للصخرى للرمل هو الحجر الرملي sandstone (شكل 3.7). وقد حظي الحجر الرملي بأكثر قدر من الاهتمام مقارنة بالمجموعات الفتاتية الأخرى، بسبب انتشاره الواسع، وسهولة تعرف

ويوجد عدد ضئيل نسبياً من البيئات التي تتميز بوجود تيارات قوية بدرجة تكفي لنقل الحصى مثل مجاري المياه في منحدرات الجبال شديدة الانحدار، والشواطئ الصخرية التي تضربها الأمواج العالية، والمياه المنصهرة من المشالج. كما قد تحمل التيارات القوية الرمال أيضاً، حيث يتسبب بعض الرمل مع الجرول والبعض الآخر يتسرب في المسام بين الكسرات بعد ترسيب الرواسب الفتاتية الكبيرة. ويؤدي نقل الحصى والحصى الكبير على الأرض أو في الماء إلى بريها واستدارتها، حيث يسبب النقل لمسافة 100 كم استكمال استدارة الحصى وجعلها ناعمة. وتتحرك حبيبات جرول الشواطئ للأمام والخلف باستمرار بواسطة الموجات القوية مما يؤدي إلى استدارتها أيضاً. أما إذا سلمت الحبيبات وكسرات الصخور من البرى، وبقيت ذات زوايا حادة، فإنها يطلق عليها بريشيا رسوبية sedimentary breccias (شكل 8.7 ب). وتوجد البريشيا الرسوبية في الرواسب القريبة من المصدر الذي نشأت منه، والتي لم تنقل لمسافات بعيدة. وليست كل البريشيا ذات أصل رسوبي، فقد تتكون



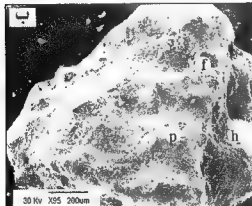
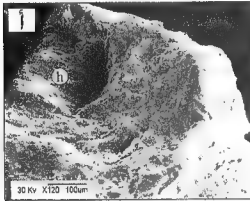
ب

شكل (8.7): الصخور الرسوبية الفتاتية:

- (أ) كونجلومرات conglomerate (كونجلومرات الحماصات طريق قفط - القصير. أ. د. محمود عبد الغفور حسن هنبر المواد النووية).
 (ب) بريشيا breccia، منطقة سوهاج، وادي النيل - مصر (مجموعة أ. د. سليمان محمود سليمان، قسم الجيولوجيا، جامعة عين شمس)

ردىء الفرز. وقد تساعد درجة الفرز في التمييز بين رسال الشواطئ (جيدة الفرز) ، والرسال الطينية المترسبة بواسطة المثالج (ردئية الفرز) .

أشكال حبيبات الرمل: تعتبر أشكال حبيبات الرمل مهمة أيضا في الاستدلال على ظروف نشأة الرمال. فحبيبات الرمل مثل الحبيبات الفتاتية الأخرى تكون مستديرة نتيجة البرى حيث تصطدم بعضها البعض أثناء النقل. وتدل استدارة الحبيبات على المسافة الطويلة التي قطعتها الحبيبات في مجرى النهر الطويل أثناء النقل، بينما تدل الحبيبات المزواة على النقل لمسافات قصيرة. وتصبح حبيبات الرمل مستديرة أيضا نتيجة الحركة للأمام والخلف بواسطة الأمواج على الشواطئ. ومع ذلك، فإن معظم حبيبات الرمل تأخذ أشكالها الكروية والمستطيلة أو المنبسطة من أشكال البلورات الأصلية في الصخر الأصلي.



أصل نشأته وظروفها. فتحتوى مثلاً عديد من الأحجار الرملية على طباقية متقاطعة، والتي تدل على اتجاه التيار النازل، لذلك فإن الأحجار الرملية تكون ذات أهمية في عمل خريطة للتيارات القديمة التي تدل على اتجاه المجرى المائى السابق أو الرياح أو تدفق المياه في البحار الضحلة.

أحجام حبيبات الرمل: تصنف حبيبات الرمل إلى دقيقة الحجم أو متوسطة أو خشنة. ويعكس متوسط حجم الحبيبات في الحجر الرملى كلاً من حجم البلورات التي تم تجوئتها من الصخر الأصل، وقوة التيار الذي حملها. ولا يدل حجم الحبيبات على كل تفصيلات النشأة، حيث إن مدى حجم الحبيبات، ونسبة انتشار الأحجام المختلفة لها أهمية أيضا. فإذا كانت أحجام الحبيبات متقاربة، فإن الرمل يكون جيد الفرز. أما إذا كان الكثير من الحبيبات ذات حجم أكبر أو أصغر من متوسط الأحجام، فإن الرمل يكون

شكل (9.7): الملامح المميزة لأسطح حبيبات رمل من الكوارتز كما ترى من خلال المجهر الإلكتروني الماسح scanning electron microscope (SEM)، جبال العوهة - الحوية - الإمارات العربية المتحدة.

(أ) سطح حبيبة مزواة angular من الكوارتز تظهر حفرة عميقة مستطيلة (h) تكونت نتيجة الإذابة المستمرة لفترة طويلة للسيليكا على سطح حبيبة الكوارتز.
(ب) مستويات كسر متلرجة (f) وحفر (p) وحفرة عميقة (h) تكونت نتيجة التصادم بين حبيبتى رمل أو حبيبة رمل وسطح خشن. وتتميز تلك الملامح للتكون ميكانيكيا الرواسب الشاطئية.

(After El Saily, A. K., 2004: Facies, depositional environments and diagenesis of the Upper Cretaceous-Lower Tertiary sediments at Auha-Ai Faiyah stretch, United Arab Emirates. Ph. D. thesis, Faculty of Science, U.A.E. University, U.A.E).

الأنواع الرئيسية للأحجار الرملية: يمكن تقسيم الأحجار الرملية إلى عدة مجموعات رئيسية بناءً على التركيب المعدني والنسيج وهي:

▪ **كوارتز أرينيت quartz arenite** ويتكون كلية من حبيبات كوارتز، جيدة الفرز ومستديرة عادة (شكل 10.7 أ). وتنشأ هذه الرمال المكونة من حبيبات الرمل الخالصة نتيجة التجوية الشاملة التي حدثت قبل وأثناء النقل وأزالت كل المعادن ماعدا الكوارتز، وهو أكثر المعادن ثباتا واستقرارا.

▪ **أركوز arkose**: ويتنوع على أكثر من 25٪ فليسا، حيث تميل الحبيبات أن تكون مزواة إلى شبه مستديرة وأقل في درجة الفرز عن الحجر الرملي المكون من الكوارتز الخالص (شكل 10.7 ب). وتنشأ هذه الأحجار الرملية الغنية بالفلسبارات من التجوية السريعة لمناطق مكونة من صخور جرانيتية ومتحولة، حيث تكون التجوية الكيميائية أقل تأثيرا من التجوية الفيزيائية.

▪ **حجر رملي صخري lithic sandstone**: وهو يحتوى على عديد من الكسرات المستمدة من صخر دقيق التحبب غالبا مثل الطفل، أو صخور بركانية وصخور متحولة دقيقة التحبب (شكل 10.7 ج)

▪ **جريواكي graywacke**: وهو صخر رصاصي قاتم اللون، صلد، يتكون من خليط غير متجانس من كسرات صخرية وحبيبات مزواة رديئة الفرز من الكوارتز والفلسبار، في حجم حبيبات الرمل مدفونة في أرضية صلصالية دقيقة التحبب (شكل 10.7 د). وتكون معظم هذه الأرضية نتيجة التغير الكيميائي والكبس الميكانيكي والتشوه لكسرات صخور لينية نسبية - مثل: صخور الطفل وبعض الصخور البركانية بعد الدفن العميق للحجر الرملي.

كما تتم أيضا دراسة أسطح الحبيبات باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح Scanning electron microscope (SEM) لإظهار ملامح مميزة تستخدم للاستدلال منها على الظروف التي تعرضت لها الرواسب أثناء النقل والترسيب (شكل 9.7 أ و ب).

التركيب المعدني: يمكن التنبؤ بطبيعة المصادر التي تمت تجويتها لتكوين حبيبات الرمل، من خلال دراسة التركيب المعدني للرمال والأحجار الرملية. حيث يدل وجود فلسبارات غنية بالصدوديوم أو البوتاسيوم مع وفرة الكوارتز على أن الرواسب تم تجويتها من مناطق جرانيتية. كما تدل بعض المعادن الأخرى مثل الكيانيت والاشتوروليت على أن الصخور الأصلية كانت صخورا متحولة.

وقد لا يتفق التركيب المعدني للرمل أو الحجر الرملي بالضبط مع التركيب المعدني للصخر الأصلي، حيث تعمل التجوية الكيميائية على إذابة معظم فلسبار الصخر الأصلي كالجرانيت بحيث لا يبقى إلا حبيبات الكوارتز. ولذلك فإننا نستطيع من تحليل التركيب المعدني للرمل أو الحجر الرملي، أن نستنتج نوع الصخر الأصلي، بالإضافة إلى بعض المعلومات عن العوامل التي أثرت في التجوية في منطقة الصخر الأصلي مثل المناخ. كما يمكن أيضا مضاهاة التركيب المعدني للصخور الأصلية بالأوضاع في تكتونية الألواح. فعلى سبيل المثال، فإن الأحجار الرملية المحتوية على وفرة من كسرات الصخور البركانية المافية تكون قد نشأت من أقواس بركانية volcanic arcs عند نطاقات الاندساس.

اليورانيم المستخدم في مشاريع توليد الطاقة النووية والأسلحة النووية يُحصَل عليها من اليورانيم الناتج من عمليات ما بعد الترسيب في الحجر الرملي .

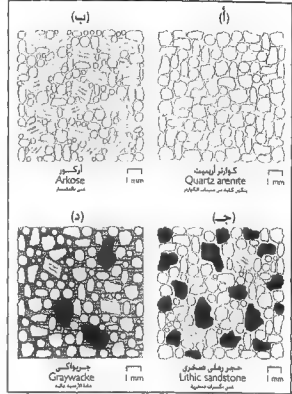
3- الفتاتيات دقيقة التحجب : الغرين وحجر الغرين والطين والحجر الطيني والطفل

يعتبر الغرين وحجر الغرين والطين والحجر الطيني والطفل أدق الرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية حجيا . ويقل قطر الحبيبات المكوّنة لهذه الرواسب كلها عن 0.062 مم ، ولكن تختلف هذه الحبيبات اختلافا كبيرا في المدى الذي يقع فيه حجم الحبيبات وكذلك التركيب المعدني . وترسب الرواسب دقيقة التحجب بواسطة ألطف التيارات ، والتي تسمح لأدق الحبيبات أن ترسب ببطء إلى القاع في وجود الأمواج الهادئة . وفيما يلي وصف لكل من هذه الأنواع :

الغرين وحجر الغرين: siltstone

هو المقابل الصخري للغرين silt ، وهو راسب فتاتي يتراوح قطر حبيباته بين 0.0039 و 0.062 مم . ويكون حجر الغرين مشابها للحجر الطيني أو الحجر الرملي دقيق الحبيبات جدا .

الطين وحجر الطين والطفل: mud هو أى راسب فتاتي تكون فيه قطر معظم الحبيبات أقل من 0.062 مم (جدول 2.7) . وترسب الطين بالأنهار وفي مناطق المد والجزر . فبعد أن يفيض النهر في الأراضي المنخفضة ، وبعد أن يتراجع ويتقهقر الفيضان ، يبطئ التيار وترسب الطين الذي يؤدي إلى خصوبة أراضي قاع النهر . كما تتخلف رواسب الطين نتيجة انحصار المد على امتداد عديد من مسطحات المد والجزر ؛ حيث يكون تأثير الأمواج معتدلا . وتغطي رواسب الطين معظم قيعان المحيطات العميقة حيث تكون التيارات ضعيفة أو منعدمة .



شكل (10.7): التركيب المعدني لأربعة أنواع رئيسية من الحجر الرملي .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ويهتم كل من جيولوجي المياه الجوفية والبتترول بدراسة الحجر الرملي . ويعول جيولوجيو المياه الأرضية على فهم أصل الحجر الرملي للتنبؤ بإمكانة وجود مصادر للمياه في مناطق بها حجر رملي مسامي ، مثل متكوّن الحجر الرملي النوبي ، والذي يشغل مساحات واسعة في مصر (أكثر من 90 ٪) سواء فوق السطح أو تحسّت السطح (شكل 7.13) . ويجب أن يهتم جيولوجيو البترول بدراسة مسامية ودرجة التحام الحجر الرملي ، حيث إن النفط والغاز المكتشفين خلال المائة وستين عاما الماضية قد وجدا في صخور حجر رملي مدفونة . وبالإضافة إلى ذلك ، فإن نسبة كبيرة من

قد تكون هذه الرواسب ، بالإضافة إلى بقية أنواع الصلصال تربة قديمة *paleosols* ، وهى المقابل المتحجر للتربة. وعلى الرغم من أن بعض هذه التربة القديمة لا يشبه التربة الحديثة الآن، إلا أنها قد تظهر قطعاً معدنياً مستمداً بوضوح من قطاع تربة قديمة (الفصل السادس) .

III. الرواسب والصخور الرسوبية الكيميائية والكيميائية الحيوية

تمدنا الرواسب والصخور الفتاتية بما يكفى من المعلومات عن طبيعة الصخور القارية التى نشأت منها، وظروف تجوئها . كما تمدنا الرواسب الكيميائية والكيميائية الحيوية أيضاً بما يكفى من المعلومات عن الظروف الكيميائية فى بيئة الترسيب التى تكون فى معظم الأحياء-هى المحيط . كما يحدث الترسيب الكيميائى فى البحيرات أيضاً ، وخاصة تلك المتواجدة فى المناطق القاحلة حيث يكون التبخر شديداً ، إلا أن مثل تلك الرواسب لا تمثل إلا نسبة صغيرة جداً بالنسبة لكمية الرواسب المتكونة على امتداد خطوط شواطئ المحيطات ، وعلى الرفوف القارية وفى أعماق المحيطات.

أ. تصنيف الرواسب والصخور الرسوبية الكيميائية والكيميائية الحيوية

تصنف الرواسب غير الفتاتية إلى مجموعتين هما : الرواسب الكيميائية *chemical sediments* والرواسب الكيميائية الحيوية *biochemical sediments* . ويقوم هذا التصنيف على أساس تركيبها الكيميائى (جدول 3.7). ويعكس هذا التصنيف فى حالة البشائر البحرية أنواع العناصر

والصخر دقيق التجب المقابل لراسب طينى هو حجر الطين والطفل . وحجر الطين *mudstone* هو صخر كتلى به ترقق *fissility* ضعيف أو غير موجود على الإطلاق . ويتكون الطفل *shale* من الغرين والصلصال . وتتميز هذه الصخور بوجود مستويات تطبق ، حيث تنفصل إلى رقائق على امتداد تلك المستويات . وقد يحتوى الطين وحجر الطين والطفل على أكثر من 10% كربونات ليكون راسب من طفل كلسى (جيرى) ، بينما يحتوى الطفل الأسود أو العضوى على كمية وفيرة من المادة العضوية ، التى تكونت نتيجة عمليات ما بعد الترسيب ويطلق عليه طفل الزيت *oil shales* ، الذى قد يحتوى على كميات كبيرة من المادة العضوية الزيتية ، مما يجعله مصدراً مهماً للنفط .

الصلصال وحجر الصلصال: تكون الحبيبات التى فى حجم الصلصال هى أكثر المكونات شيوعاً فى الرواسب والصخور الرسوبية دقيقة التجب . وجدير بالملاحظة أننا نشير هنا إلى أحجام الحبيبات ، وليس إلى معادن الصلصال *clay minerals* ، التى يقل قطرها عن 0.0039 مم ، والتى تتكون بنسبة كبيرة من معادن الصلصال (جدول 2.7) . وتسمى الصخور المتكونة فى معظمها من حبيبات فى حجم الصلصال ، بحجر الصلصال *claystone* . كما قد يترسب تراب *dust* يشتمل على حبيبات فى حجم الصلصال وحجم الغرين بالرياح بعد العواصف الترابية على السهول القاحلة (فصل 14).

وتكون بعض معادن الصلصال الموجودة فى الرواسب دقيقة الحبيبات (وخاصة الكاولينيت) ذات قيمة اقتصادية ، حيث تستخدم فى صناعة الخزف ، كما

وتتكون معظم الرواسب الكربوناته في البيئات البحرية الضحلة من قنات عضوى أفرزته الكائنات العضوية بطريقة كيميائية حيوية كأصناف لها ، تعيش تلك الكائنات العضوية بالقرب من سطح الماء في المحيطات أو على قاع المحيطات ثم تكسرت أصدافها بعد موتها ونقلتها التيارات البحرية . وتتراجد هذه الرواسب في الشعاب المرجانية coral reefs في المحيط الهادئ ، أو ملاصقة للشواطئ الضحلة لجزر البهاما . وبخلاف هذه المناطق الخلابية ، فإن هذه الرواسب تنتشر في قيعان المحيطات العميقة ، وهى الأماكن التى ترسب فيها معظم الكربونات حالياً . إلا أنها من العمق بحيث يصعب الوصول إليها لدراستها .

الرواسب الكربوناته العضوية: تتكون معظم الرواسب الكربوناته في المحيط من الكالسيات المكون للأصناف وهياكل الفورامينيفرا *Foraminifera* ، وهى كائنات بحرية وحيدة الخلية تعيش في المياه السطحية ، بالإضافة إلى الكائنات الحية الأخرى التى تفرز كربونات الكالسيوم الذى استخرجته من مياه البحار . وعندما تموت الكائنات الحية فإن أصدافها وهياكلها تستقر وتتراكم على قاع المحيط لتكوين رواسب . وتحتوى معظم الرواسب الكربوناته على معدن الأراجونيت بالإضافة إلى الكالسيات ، وهو شكل أقل استقراراً من الكالسيات . وكما هو معروف ، فإن بعض الكائنات الحية تكون هياكلها من الكالسيات بينما تكون الأخرى من الأراجونيت ، بينما يتكون بعضها من كليهما .

الكيميائية المذابة في ماء البحر والأيونات الأكثر شيوعاً لتلك العناصر وهى : الكلوريد (Cl^-) والمغنسيوم (Mg^{2+}) والصوديوم (Na^+) والكبريت (على هيئة كبريتات SO_4^{2-}) والبوتاسيوم (K^+) والكربونات (CO_3^{2-}) والكالسيوم (Ca^{2+}) . كما يتواجد في ماء البحر مكوّنان رئيسيان لبعض الصخور الرسوبية ولكن بكميات ضئيلة هما السيليكا (SiO_2) والفوسفور . وتمثل الكائنات الحية المكوّن الأساسى في الرواسب الكيميائية الحيوية . وتساهم أصداف الكائنات الحية المترسبة بعمليات كيميائية حيوية في تكوين الكثير من الرواسب الكربوناته في العالم ، حيث إن الكربونات هى أكثر الرواسب غير الفتاتية انتشاراً . وقد ترسب الرواسب الكيميائية بعمليات كيميائية فقط ، ولكنها أقل انتشاراً نسبياً .

1. الرواسب والصخور الرسوبية الكربوناته : الحجر الجيرى وحجر الدولوميت

تتكون الرواسب والصخور الرسوبية الكربوناته **carbonate sediments and sedimentary rocks** من تراكم معادن كربونات تكونت عضوياً أو بطريقة غير عضوية . وقد تتكون المعادن أثناء عملية الترسيب أو عمليات ما بعد الترسيب . وقد تتكون المعادن من كربونات كالسيوم أو كربونات كالسيوم ومغنسيوم . ويرجع انتشار الصخور الكربوناته إلى وجود كميات كبيرة من الكالسيوم والبيكربونات في مياه البحار ، وتستمد الكربونات من ثانى أكسيد الكربون في الغلاف الجوى ، بالإضافة إلى الكالسيوم من الحجر الجيرى السهل التجوية على القارات .

وتبنى الشعاب **reefs** هضاباً صلبة ملتحمة صغيرة من الهياكل الكربوناتية للملايين الكائنات الحية ، أو تراكيب عضوية تشبه الخيود ، تقاوم الأمواج وترتفع إلى أعلى حتى سطح البحر أو فوقه قليلاً (شكل 11.7). وتبنى المراجعين **corals** معظم الشعاب من كربونات الكالسيوم في البحار الدافئة في عالم اليوم . وهى تراكيب صلبة تختلف عن الرواسب المتراكمة في صورة لينة في بيئات أخرى . ويتكون الحجر الجيري الصلب في الشعاب مباشرة بفعل الكائنات الحية ، حيث لا توجد مرحلة انتقالية بينه وبين الراسب اللين . ويعيش فوق تلك الشعاب وحولها مئات من أنواع الكائنات الحية الأخرى المكوّنة للكربونات ، مثل القواقع والمحاريات التى تعيش قرب خطوط الشواطئ الحالية . كما تكوّن الطحالب البحرية الكربونات أيضاً ، وهى كائنات حية وحيدة الخلية تشبه النباتات البدائية التى تنمو على الشعاب وفي بيئات كربوناتية أخرى .



شكل (11.7): شعاب مرجانية **coral reefs** تحيط بجزيرة بركانية في المركز . وتظهر الشعاب المرجانية في مقدمة الصورة ، حيث تكون مسانراً لبحيرة لاجون خلفها .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

جدول (3.7): تصنيف الرواسب والصخور الرسوبية الكيميائية والكيميائية الحيوية

الرواسب	الصخر	التركيب الكيميائي	المعادن
كيميائي Chemical			
لا يتكون بالترسيب المباشر (تكوّن نتيجة عمليات ما بعد الترسيب)	حجر الدولوميت Dolostone	كربونات الكالسيوم والمغنسيوم $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	دولوميت Dolomite
راسب أكسيد حديد	تكوين الحديد Iron Formation	سيليكات وأكاسيد وكربونات حديد Fe_2O_3	هيماتيت Hematite ليمونيت Limonite سيدرنت Siderite
راسب تبخري	متبخرات Evaporite	كلوريد صوديوم وكبريتات الكالسيوم NaCl , CaSO_4	جبس Gypsum أنهيدريت Anhydrite هاليت Halite أملاح أخرى
لا يتكون بالترسيب المباشر (يتكوّن نتيجة عمليات ما بعد الترسيب)	فوسفات Phosphorite	فوسفات كالسيوم $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	أباتيت Apatite
سريتات (بطلوخيات) مترسبة كيميائياً من ماء البحر - كربونات مترسبة مباشرة من ماء البحر .	حجر جيري Limestone	كربونات كالسيوم	كالكيت (أراجونيت)
كيميائي حيوي Biochemical			
رمل وطنين (أساساً فتاتي حيوي)	حجر جيري Limestone	كربونات كالسيوم CaCO_3	كالكيت (أراجونيت) Calcite (Aragonite)
راسب سيليكى	تشرت Chert	سيلكا SiO_2	أوبال Opal الكاليدوني Chalcedony كوارتز Quartz
خُث (بيت)، مادة عضوية	صخور عضوية Organics	مركبات كربونية كربون مترابط مع أكسجين وهيدروجين	فحم Coal زيت خام Oil غاز طبيعي Gas

الكربونات في هذه المناطق الضحلة قد ترسب لا عضوياً، بشكل مباشر من ماء البحر. والأساس الكيميائي لترسيب الكربونات لاعضوياً هو توافر أيونات الكالسيوم (Ca^{2+}) والبيكربونات (HCO_3^-) بدرجة كافية في ماء البحر. ويتوافر ذلك بصفة خاصة في المناطق الاستوائية الدافئة من المحيطات، و يترسب الكربونات نتيجة التفاعل الكيميائي التالي:

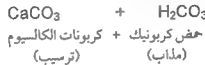
رواسب الكربونات غير العضوية: كان يعتقد حتى وقت قريب أن كل كربونات الكالسيوم أصلها عضوي، ولا تتكون مباشرة من ماء البحر. ولكن أوضحت البحوث التي أجريت على البحيرات الشاطئية (اللاجونات lagoons) وهي بحيرات مالحة ضحلة تجاور البحر وقد تتصل به) وعلى المنحدرات الصاعدة في جزر البهاما أن جزءاً كبيراً من الطين



شكل (12,7): حجر جيري حفرى كوكينا (coquina) طريق سفاجا - القصير ، الصحراء الشرقية ، مصر . (د. ضياء الدين محمد كامل ، قسم الجيولوجيا ، جامعة القاهرة) .

وتمثل الأرصفة الكربوناتية **carbonate platforms** بيشات كربوناتية أخرى في كل من العصور الجيولوجية القديمة والحديثة ، مثل شواطئ جزر البهاما . وهذه الأرصفة عبارة عن مساحات مستوية ممتدة وضحلة ؛ حيث يتم ترسيب كل من الكربونات الحيوية وغير الحيوية . ويوجد تحت مستوى الرصيف منحدرات كربوناتية ، وهى منحدرات لطيفة تتجه ناحية المياه العميقة وتتراكم عليها رواسب كربوناتية معظمها دقيقة التحبب .

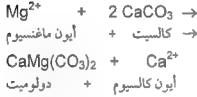
وفىما يلى وصف لأكثر الصخور الكربوناتية شيوعا: الحجر الجيري وهو أكثر الصخور الرسوبية المتكونة بالعمليات الكيميائية الحيوية شيوعا . ويتكون الحجر الجيري **limestone** أساسا من كربونات الكالسيوم (CaCO_3) فى صورة معدن الكالسيت .



وعندما تفرز الكائنات العضوية الحية الأصداف الكربوناتية ، فإنها تعتمد على التفاعل الكيميائى نفسه ولكن بوسائل كيميائية حيوية.

رواسب الكربونات من أصل مختلط: تتكون بعض الرواسب الكربوناتية من رواسب الطين الكربوناتى دقيقة التحبب ، والتي نشأت من أصل مختلط (عضوى وغير عضوى) ؛ حيث تتكون هذه الرواسب من كسرات ميكروسكوبية الحجم من الأصداف والطحالب الجيرية ، ومعها رواسب غير عضوية.

الدولوميت **dolostones** أحد رواسب الكربونات والحجر الجيري التي تعرضت لعمليات ما بعد الترسيب . ولا يتكون معدن الدولوميت بالترسيب المباشر من مياه البحر العادية ، أى كراسب أولى . كما أنه لا توجد كائنات حية تفرز أصداقاً مكونة من معدن الدولوميت . وبدلاً من ذلك ، يتحول الكالسيت أو الأراجونيت المتكون أصلاً في الرواسب الكربوناتية إلى دولوميت مباشرة بعد الترسيب نتيجة لإحلال أيونات الكالسيوم بأيونات ماغنسيوم من ماء البحر الذى يتخلل ببطء مسام الرواسب .



وعند مقارنة التراكيب الرسوبية والتركيب المعدني وأنسجة الرواسب الكربوناتية المتكونة حالياً بتلك الموجودة في الأحجار الجيرية وأحجار الدولوميت القديمة ، يمكن معرفة كيف تكونت الصخور القديمة.

2. الرواسب والصخور الرسوبية التبخرية

تتكون الرواسب والصخور الرسوبية التبخرية **evaporite sediments and sedimentary rocks** لعضوياً ، من تبخر ماء البحر أو ماء البحيرات المتواجدة في المناطق الجافة القاحلة ، والتي لا يغذيها تدفق نهري من الخارج .

المتبخرات البحرية: المتبخرات البحرية **marine**

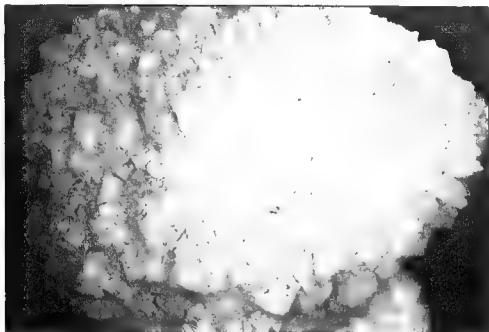
evaporites هي رواسب وصخور رسوبية كيميائية تكونت نتيجة تبخر ماء البحر. وتحتوي هذه الرواسب والصخور بصفة أساسية على معادن تكونت نتيجة تبلور كلوريد الصوديوم المعروف باسم معدن الهاليت (شكل 13.7 أ)، وكبريتات الكالسيوم (الجبس

وهناك نوع من الحجر الجيري يسمى كوكينا coquina (شكل 12.7) يتكون من تلاحم أصداف تراكمت على القاع الضحل للبحر بالقرب من الشاطئ. ويتميز هذا الصخر بنسيج فتاتي ، ويكون عادة خشن الحبيبات حيث يمكن تمييز الأصداف وفتاتها . أما الطباشير chalk فهو نوع من الحجر الجيري الفتاتي العضوي فاتح اللون مسامي ودقيق الحبيبات ، ويتكون من تراكم هياكل كائنات حية ميكروسكوبية بحرية على قاع البحر .

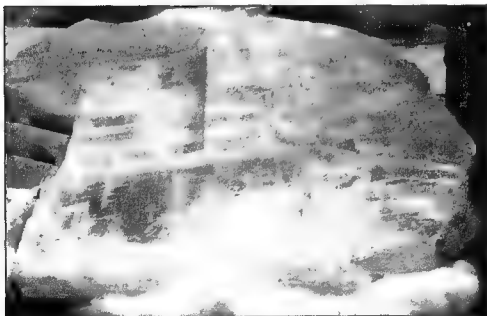
والحجر الجيري السريثي (البطروخي) oolitic limestone هو نوع من الحجر الجيري غير العضوي يتكون نتيجة تلاحم سريثيات oolites وهى كرات صغيرة في حجم حبيبات الرمل (0.062 - 2 مم) ، وتتكون من الكالسيت غير العضوي الذى ترسب في ماء بحر ضحل دافئ . وتعمل تيارات المد والجزر القوية على درجة السريثيات للأمام والخلف يومياً ، مما يعمل على ثبات شكلها الكروي أثناء نموها . وقد يساهم تأثير الأمواج في نمو السريثيات (البطروخيات).

أما التufa والترافرتين travertine فهى أحجار جيرية غير عضوية تتميز بنسيج متبلور ، وتتكون بترسيب كربونات الكالسيوم من ماء عذب . وترسب التufa من محلول مائي يخرج من ينبوع أو بحيرة فوق اليابسة . وقد يتكون الترافرتين في الكهوف عندما تفقد قطرات صغيرة من الماء الغنى بالبكربونات المذابة ثاني أكسيد الكربون نتيجة انخفاض الضغط داخل الكهف .

حجر الدولوميت: وهو من الصخور الجيرية الشائعة أيضاً ، ويتكون من معدن الدولوميت الذى هو عبارة عن كربونات الكالسيوم والمغنسيوم $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (جدول 3.7) . وأحجار



1



2

شكل (13.7): الصخور الرسوبية الكيميائية والكيميائية الحيوية.

(أ) هاليت.

(ب) جيس، منطقة العلمين - غرب إسكندرية - مصر.

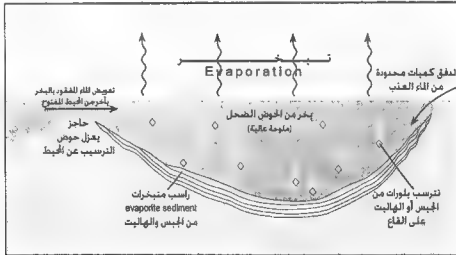
(مجموعة أ.د. سليمان محمود سليمان، قسم الجيولوجيا - جامعة عين شمس).

وفي مثل هذه المواقع يتبخر الماء باضطراب ، بينما تسمح فتحات ماء البحر بالتدفق لتعويض الماء المتبخر من الشرم . ونتيجة لذلك ، تبقى هذه المياه عند حجم ثابت ، ولكنها تكون أكثر ملوحة من المحيط المفتوح . وتبقى مياه الشرم فوق مشبعة باستمرار وترسب باضطراب معادن تبخرية على قاع الحوض الذى تتم فيه عملية التبخر.

ومعادن الكربونات هي أول الرواسب التى تتكون عندما يبدأ ماء البحر فى التبخر ، حيث يترسب الكالسيت أولاً ، يليه الدولوميت نتيجة لتفاعلات ما بعد الترسيب. ويؤدى التبخر المستمر إلى ترسيب الجبس $gypsum$ ، (كبريتات الكالسيوم $CaSO_4 \cdot 2H_2O$) (شكل 13.7 ب و 14.7) ، والجبس هو المكون الرئيسى للجبس $plaster$. وباستمرار التبخر ، يبدأ معدن الهاليت $halite$ (NaCl) فى التبلور ، وهو واحد من الرواسب الكيميائية التى تتكون من تبخر ماء البحر (انظر شكل

والأنهيدريت) شكل (13.7 ب) واتحاد أيونات أخرى شائعة فى ماء البحر . ويصبح ماء البحر أكثر تركيزاً كلما زادت عملية التبخر ، مما يؤدى إلى تبلور المعادن فى تتابع معين . وتتكون بعض المعادن نتيجة الترسيب المباشر (رواسب أولية) بينما تتكون معادن أخرى نتيجة تفاعلات ما بعد الترسيب . ويتغير تركيب ماء البحر باستمرار نتيجة تبخر ماء البحر وترسيب الأيونات الذائبة المكونة لتلك المعادن .

ويوضح الحجم الضخم للمتبخرات البحرية والتى يبلغ سمكها أحياناً بضع مئات من الأمتار ، أنها لا يمكن أن تتكون من الكمية الصغيرة من المياه المتواجدة فى شرم ضحل أو بركة . لذلك فإن كمية ضخمة من ماء البحر لابد أن تكون تبخرت. والطريقة التى تتبخر بها كميات ضخمة من ماء البحر تكون واضحة فى الأشرم أو أذرع البحر التى تتوافر فيها ثلاثة شروط (شكل 14.7) وهى قلة الماء العذب المتدفق من الأنهار والاتصال المحدود بالبحر المفتوح والمناخ الجاف.



شكل (14.7): تكوين صخور التبخرات . يتكون الجبس والهاليت كرواسب متبخرات عندما يتبخر ماء البحر من أحواض الترسيب الضحلة ضعيفة الاتصال بالبحر المفتوح ، حيث تكون الملوحة فى أحواض التبخر أعلى من ملوحة ماء البحر المفتوح ؛ مما يؤدى إلى تكون الجبس بالترسيب ، كما تؤدى استمرار الزيادة فى الملوحة إلى تبلور الهاليت.

After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, (New York)

13.7 أو 14.7). والهاليت هو ملح الطعام المستخدم في حياتنا اليومية. وفي المراحل النهائية من التبخر، وبعد تكوّن كلوريد الصوديوم، ترسب كلوريدات وكبريتات الماغنسيوم والبرتاسيوم.

وقد دُرِس هذا التابع الترسيبي معمليًا، ووجد أنه يتفق مع تتبع الطبقات الموجود في بعض متكونات الملح الطبيعية. وتتكون معظم رواسب المتبخرات في العالم من تتابعات سمكية من الدولوميت والجبس والهاليت، ولكنها لا تحتوى على رواسب المرحلة النهائية. وقد لا تصل بعض التتابعات الأخرى إلى تكوّن معدن الهاليت. ويدل غياب المراحل النهائية على أن ماء البحر لم يتبخر كلية، بسبب تعويض الماء المتبخر بمياه بحر عادية مع استمرار عملية التبخر.

المتبخرات غير البحرية: تتكون رواسب المتبخرات أيضًا في بحيرات المناطق الجافة (القاحلة)، التي يدخل إليها قليل من المياه العذبة أو ربما لا تدخل إليها أى مياه عذبة على الإطلاق. وفي مثل هذه البحيرات، يتحكم التبخر في مستوى البحيرة، وتتراكم الأملاح المستمدة من التجوية الكيميائية للصخور. ومن الأمثلة المعروفة في العالم لمثل هذه البحيرات بحيرة قارون (بركة قارون) وهى البحيرة الوحيدة المالحة والدائمة والمغلقة في مصر، حيث تقع في الصحراء الغربية في أعظم نقطة من منخفض الفيوم، جنوب غرب القاهرة. وتغطى البحيرة مساحة 240 كم²، وهى بحيرة ضحلة يتراوح عمق الماء في معظم أجزائها ما بين 2-5 م، ويصل ارتفاع سطح الماء نحو 45 م تحت مستوى سطح البحر. وتتأثر البحيرة بعمليتين أساسيتين هما دخول الماء عن طريق مصرفين ومعدل التبخر العالى، حيث إنها لا تتلقى الماء من النيل مباشرة. ويتراوح المعدل السنوى لدرجة ملوحة ماء البحيرة بين 39.7 و 42.3 جم/لتر.

وفي المناطق الجافة (القاحلة)، قد تتجمع في بعض البحيرات الصغيرة أملاح غير عادية، مثل أملاح البورات (مركبات لعنصر البورون)، وتصبح المياه أكثر قلوية. ويكون الماء في هذا النوع من البحيرات ساما. كما تكون هذه البحيرات مصادر مهمة لبعض الرواسب المعدنية الاقتصادية مثل البورات والنيترات.

3- الرواسب السيليكية: مصدر للتشترت

يعتبر التشترت **chert** من أول الصخور الرسوبية التي استخدمها القدماء في الأغراض العملية. ويتكون التشترت من سيليكيا (SiO_2) مترسبة نتيجة عمليات كيميائية أو كيميائية حيوية. وهو يتميز بصلادته الشديدة وإمكانية تهذيبه وتشكيله، ولذا فقد استخدمه الصيادون القدماء في صناعة أدوات الصيد وخاصة السهام. وللتشترت اسم شائع هو الصوان **flint**. وتوجد السيليكيا في معظم التشترت في شكل كوارتز دقيق التبلور للغاية (خفى التبلور **cryptocrystalline**). وتكون السيليكيا في التشترت الحديث أقل في درجة التبلور (عديمة التبلور) لتكوّن ما يعرف بالأوبال **opal**، وهو مثل الكوارتز يتكون من ثاني أكسيد السيليكون ولكن يحتوي على نسبة متغيرة من الماء ($\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$).

وترسب السيليكيا أيضًا بطريقة كيميائية حيوية، مثل كربونات الكالسيوم، حيث تفرز الكائنات الحية التي تعيش في المحيط السيليكات على هيئة أصداف. وعندما تموت هذه الأحياء، فإنها تغوص إلى قاع المحيط العميق حيث تتراكم أصدافها على هيئة طبقات من راسب السيليكيا. وبعد دفن هذه الرواسب السيليكية تحت رواسب أخرى أحدث، فإن مكوناتها تتلاحم نتيجة عمليات ما بعد الترسيب (الكبس) لتكوّن التشترت. كما يتواجد التشترت أيضًا في هيئة

الكائنات التي كانت حية يوما ما ثم دفنت . والفحم عبارة عن صخر رسوبي تكوّن بطريقة كيميائية حيوية . وهو يتكون من كربون عضوي تكوّن نتيجة عمليات ما بعد الترسيب (الدفن) لنباتات المستنقعات .

والزيت الخام oil crude والغاز الطبيعي natural gas هي سوائل وغازات لا تصنف عادة مع الصخور الرسوبية ، ولكن يمكن اعتبارها رواسب عضوية لأنها تتكون نتيجة عمليات ما بعد الترسيب لمادة عضوية في مسام الصخور الرسوبية . ويؤدي الدفن العميق للسادة العضوية والمترسبة أصلا مع رواسب غير عضوية لتحويلها إلى سائل يهاجر إلى صخور أخرى مسامية ، حيث يُجسّ فيها ويُمنع من الوصول إلى سطح الأرض لوجود طبقة غير مسامية تقع فوق الطبقة الحاوية له . وغالبا ما يتواجد النفط والغاز في صخور الحجر الرملي لمساميتها ونفاذيتها العالية ، وأيضا الحجر الجيري لاحتوائه على شروخ وفواصل .

IV. التركيب الرسوبية

تتكون كثير من التراكيب والتي يطلق عليها التراكيب الرسوبية sedimentary structures ، والتي تعرف أيضا بالتراكيب الرسوبية الأولية primary sedimentary structures أثناء ترسيب الصخور الرسوبية أو بعد ترسيبها بفترة قصيرة . وترجع أهمية هذه التراكيب إلى أنها تمد الجيولوجيين بالأدلة عن كيفية نقل الراسب ، ومكان أو بيئة ترسيبه . كما تساعد التراكيب الرسوبية في تحديد التسارع الاستراتيجرافي الصحيح للطبقات، حيث توجد أقدم طبقة عند قاع التسارع ، وتكون الأحدث لأعلى عند قمته . ويساعد تحديد التسارع الاستراتيجرافي في استنتاج

عقيدات nodules (العقيدة هي كتلة مدورة أو منتظمة دون تركيب داخلي معين) وكتل غير منتظمة نتيجة عمليات ما بعد الترسيب وإحلال الكربونات في الحجر الجيري والدولوميت .

4. تكوين الرواسب بعمليات ما بعد الترسيب: فوسفوريت

الفوسفوريت أحد الرواسب الكيميائية والكيميائية الحيوية التي ترسب في البحر. ويسمى الفوسفوريت phosphorite أحيانا بصخر الفوسفات phosphate rock وهو يتكون من فوسفات الكالسيوم ، التي ترسبت من ماء بحر غني في الفوسفات في أماكن على امتداد حواف القارات ، حيث تصعد تيارات الماء العميق البارد ، والمحتوية على الفوسفات وبعض المخصلات الأخرى . ويتكون الفوسفوريت بعمليات ما بعد الترسيب نتيجة التفاعل بين رواسب طينية أو كربونائية والماء الغني بالفوسفات .

5. رواسب أكسيد الحديد: مصدر لمتكوّن الحديد

متكوّنات الحديد iron formations عبارة عن صخور رسوبية تحتوي عادة على أكثر من 15٪ حديد ، في شكل أكاسيد وسيليكات وكربونات . وقد تكونت معظم هذه الصخور في فترة مبكرة من التاريخ الجيولوجي ، حيث كانت نسبة الأكسجين في الغلاف الجوي أقل من النسبة الحالية . ونتيجة لذلك ، كان الحديد أسهل في الذوبان ، حيث يُنقل الحديد الذائب إلى البحر وترسب .

6. المادة العضوية مصدر للفحم والنفط والغاز

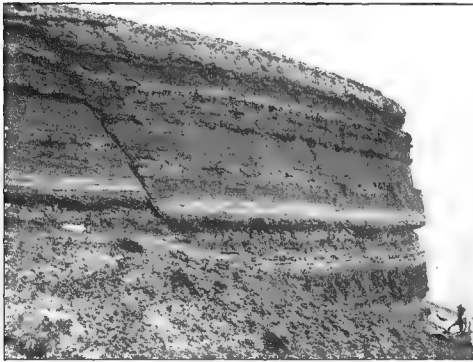
تتكون الصخور الرسوبية العضوية organic sedimentary rocks كليا أو جزئيا من رواسب عضوية غنية بالكربون، تكونت نتيجة لتحلل مكونات

التطبيق . وقد يؤدي توقف الترسيب إلى التطبيق أيضا ؛ حيث إن المادة الجديدة لا تكون مثل المادة القديمة تماما . وقد تكون الطبقات رقيقة ، حين يكون سمكها ستيمترات أو ميلليمترات وتسمى رقائق *laminae* ، بينما قد يصل سمك الطبقات إلى أمتار . ويعكس سمك الطبقة استمرار عملية الترسيب . وعادة ما تكون الرواسب أفقية التطبيق ، إلا أن الصخور الرسوبية تحتوى أيضا على أنواع أخرى عديدة من التطبيق ، والتي لا تكون كلها أفقية .

وضع الصخور التي تصدعت أو طويت في المناطق النشطة تكتونيا . ونعرض فيما يلي وصفا لبعض هذه التراكيب :

أ. التطبيق

يعتبر التطبيق *bedding* أو *stratification* صفة أو سمة مميزة للرواسب والصخور الرسوبية (شكل 15.7) . وتدل الطبقات *strata* (مفردها طبقة *stratum*) المتوازية والمكونة من حبيبات مختلفة الحجم



شكل (15.7): التطبيق *bedding* في صخور من الطفل المتغير اللون *variegated shale* ، وهو من الصفات المهمة في الصخور الرسوبية . لاحظ وجود صدع عادي *normal fault* (يسار الشكل) يقطع طبقات الصخور الرسوبية . جبل الدست ، الواحات البحرية - الصحراء الغربية - مصر . (د. ضياء الدين محمد كامل - قسم الجيولوجيا - جامعة الأزهر) .

ب. التطبيق المتقاطع

يتكون التطبيق المتقاطع *cross-bedding* من مجموعات من الطبقات المائلة الرقيقة (الرقائق) داخل طبقة صخرية أكبر (شكل 16.7) ، والتي ترسبت بواسطة الرياح أو المياه ، وتميل هذه الرقائق بزوايا قد

أو التركيب ، على وجود أسطح ترسيب متتالية تكونت وقت الترسيب . وتفصل الطبقات أسطح التطبيق *bedding planes* ، وهى أسطح منبسطة ، تميل الصخور أن تنفصل على امتدادها . ويؤدي التغير في حجم الحبيبات أو تركيب الراسب إلى نشأة أسطح



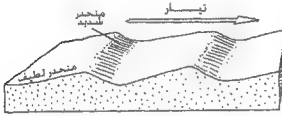
شكل (16.7): التطبق المتقاطع cross-bedding، حيث تمكس الانحاضات المختلفة للتطبق المتقاطع في الحجر الرملى التفرات في انحاء التيارات وقت الترسيب . (الواحات البحرية ، الصحراء الغربية - مصر) . (أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن ، هيئة المواد النووية) .

جـ . التطبق المتدرج

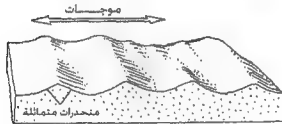
يتمثل التطبق المتدرج **graded bedding** في أن الحبيبات خشنة التحب تتواجد عند قاعدة الطبقة ، ثم يقل حجم الحبيبات تدريجيا كلما انجهدا إلى أعلى الطبقة (شكل 17.7) . ويعكس هذا التدرج في حجم الحبيبات تفاؤل سرعة التيار الذى أدى إلى الترسيب . ويتراوح سمك الطبقة المتدرجة والتي تحتوى على مجموعة واحدة من الطبقات الخشنة إلى الدقيقة من عدة سنتيمترات إلى عدة أمتار . وترسب مجموعات

تصل إلى 35° عن الأفقى . ويتكون هذا النوع من التطبق حينما تترسب الحبيبات بواسطة الرياح على المنحدرات الحادة للكيمان الرملية على اليابسة أو في الحواجز الرملية في الأنهار وعلى قاع المحيطات أو في السدلتاوات عند مصبات الأنهار . ويشيع التطبق المتقاطع في الحجر الرمل ، كما يتواجد أيضاً في الجبرول وبعض الرواسب الكربونائية . وتجدر الإشارة إلى أن التطبق المتقاطع يكون ظاهرا في الحجر الرملى عنه في الرمال المفككة .

الحواجز الرملية تحت الماء في مجارى المياه الضحلة أو تحت الأمواج الشاطئية . ويمكن التمييز بين علامات النيم المتأثلة *symmetrical ripples* وتسمى أيضا بعلامات نيم التآرجح *oscillation ripples*، والتي تنشأ بفعل حركة الأمواج السطحية جيئة وذهابا على الشاطئ، وبين علامات النيم غير المتأثلة *asymmetrical ripples* والتي تتكون من التيارات التي تتحرك في اتجاه واحد فوق حواجز رملية في النهر، أو كتبان رملية تكوّنها الرياح (شكل 18.7). ويشير وجود هذه العلامات في الصخور الصلبة إلى اتجاه حركة الرياح أو تيارات الماء القديمة .



علامات نيم غير متأثلة - Asymmetrical ripple marks

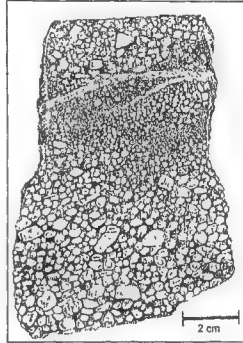


علامات نيم متماثلة - Symmetrical ripple marks

شكل (18.7): أشكال النيم على رمال الشاطئ تكون التموجات متأثلة *symmetrical* عندما تكون حركة الأمواج إلى الأمام والخلف، بينما تكون التموجات غير متأثلة *asymmetrical* عندما تكون حركة التيار في اتجاه واحد .

هـ. تراكيب التقلب الحيوى (الاضطراب الحيوى) ينشأ تركيب التقلب الحيوى (الاضطراب الحيوى) *bioturbation* حينما تقوم الكائنات الحية مثل الديدان وغيرها بحفر مسالك أو أنفاق لها في طين ورمال رواسب قاع البحر . ويرتب على ذلك تغير في شكل أسطح الطباقية في عديد من الصخور الرسوبية، كما قد تخترق تلك الأنابيب الأسطوانية التي قد يبلغ

الطبقات المتدرجة التي قد يبلغ سمكها الكلى عدة مئات من الأمتار في مياه المحيط العميقة بواسطة تيارات العكر *turbidity currents* التي تتحرك على قاع المحيط . ويساعد التطبيق المتدرج في تعرف الطبقات المقلوبة .



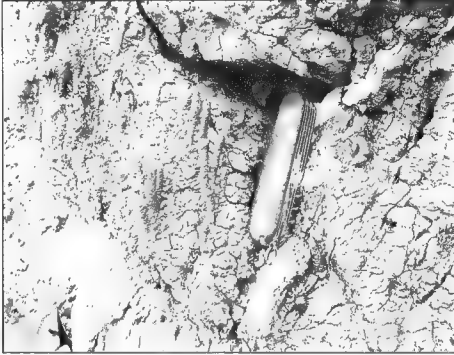
شكل (17.7): التطبيق المتدرج *graded bedding* كونهلومات، ولاية تنسى الأمريكية، حيث تتركز الحبيبات الخشنة عند قاع الطبقة ويتدرج حجم حبيبات الجبرول *gravel* تدريجيا كلما اتجهنا إلى أعلى الطبقة .

د. علامات النيم

علامات النيم *ripple marks* عبارة عن كتبان صغيرة جدا من الرمل أو الغرين تنشأ على سطح الطبقات الرسوبية بحيث يكون امتدادها الطويل متعامدا على اتجاه التيار . وتتكون من سلسلة من التلال أو التموجات المنخفضة والضيقة التي قد يصل ارتفاعها إلى سستيمتر أو اثنين تفصلها قيعان أكثر اتساعا . وتواجد هذه العلامات على أسطح الرمال الحديثة، كما تتواجد أيضا على أسطح طبقات الحجر الرملي القديم (شكل 10.1). وكما أسلفنا فإنها تُرى على أسطح الكتبان المتكونة من تذبذبة الرياح أو في

الطين في رواسب قيعان البحيرات عندما تجف ، أو في رواسب الفيضان عندما ينخفض مستوى النهر . وقد يتصخر الطين المتشقق ليكون صخر الطفل ، الذى يحتفظ بالشقوق التى قد تملؤها الرمال الناعمة التى تذررها الرياح . كما تتميز أسطح الطين والرمل الناعمة بطبعات المطر rain prints (شكل 20.7ب).

قطرها عدة سنتيمترات أسطح الطباقية ، وتمتد رأسياً خلال عدة طبقات (شكل 19.7). وتتغذى هذه الكائنات الحية على الرواسب حيث أنها تحتوى على قدر ضئيل من المواد العضوية وتحلف وراءها الرواسب التى تملأ تلك المسالك. وتستخدم تلك التراكيب فى تعرف سلوك الكائنات الحية التى قامت



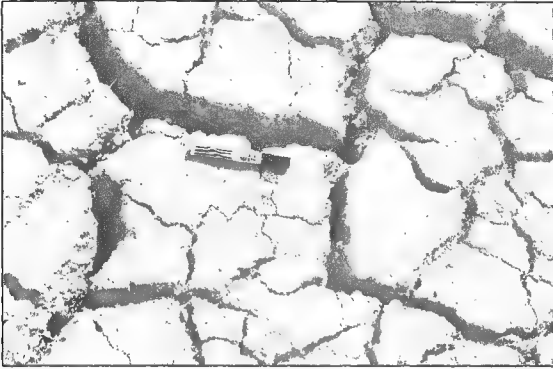
شكل (19.7): تراكيب التقلب الحيوى bioturbation حيث تحفر الكائنات الحية مسالك لها فى الرواسب ، مما يزدى إلى تكوين أنابيب أسطوانية تحفرق أسطح الطباقية . جبل الدست ، الواحات البحرية ، الصحراء الغربية ، مصر . (د. ضياء الدين محمد كامل . قسم الجيولوجيا - جامعة الأزهر) .

بحفر المسالك خلال الرواسب ، وبالتالى إعادة بناء البيئة الرسوبية .

النتابعات الطباقية bedding sequences هى

أنماط لتتابعات متداخلة interbedding مع بعضها بعضاً من الحجر الرمل والطفل وأنواع أخرى من الصخور الرسوبية. وتساعد طبيعة هذه التتابعات الطباقية فى استنتاج البشآت التى تكونت فيها هذه الرواسب. ويوضح شكل (21.7) دورة طمية ، وهى دورة من تتابعات طبقية كونتها الأنهار . ويرسب النهر

تشققات الطين mud cracks هى نمط مضلع من التشققات ، ينشأ فى الرواسب دقيقة الحبيبات من تناوب فترات المطر الخفيف والجفاف (شكل 20.7أ). ويحدث تشقق الطين أثناء فترات الجفاف . وحيث إن الجفاف يتطلب وجود الهواء ، لذلك تتكون تشققات

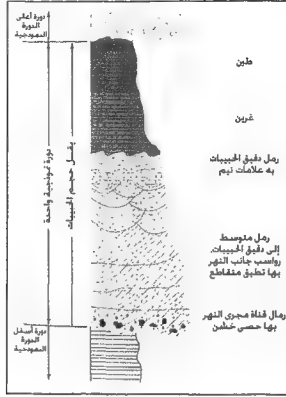


أ



ب

شكل (20.7): أ. تراكم تشققات الطين mud cracks، جبل أذن برأس الخيمة - دولة الإمارات العربية المتحدة (أ.د. أحمد عبد العزيز الكبار، قسم الجيولوجيا - جامعة القاهرة) ب. طبقات المطر rain prints، وهي حفر صغيرة شحلة لها حواف مرتفعة تتكون نتيجة سقوط قطرات المطر على سطح شقق من الطين - الواحات الخارجة - مصر. (مجموعة أ.د. سليمان محمود سليمان، قسم الجيولوجيا - جامعة عين شمس).



شكل (21.7): دورة طمية نموذجية ، حيث يتراوح سمك الدورة بين بضعة أمتار للمجاري المائية الصغيرة حتى أكثر من 20 مترا للمجاري المائية الكبيرة .

الترسيب بنوع خاص من تيارات القاع يسمى تيارات العكر. ولا يتواجد التطبيق المتدرج تقريباً في بيئات خط الشاطئ الضحل .

V. بيئات الترسيب والسحنات الرسوبية

تعرف بيئة الترسيب **depositional environment** بأنها منطقة من الأرض محددة جغرافياً ، تتميز بوجود مجموعة من العمليات الجيولوجية والظروف البيئية المميزة لها. وتتضمن هذه الظروف البيئية:

- نوع وكمية الماء سواء كانت في محيط أو بحيرة أو نهر أو أرض قاحلة جافة.
- التضاريس ، سواء كانت أراضي واطئة أى منخفضة **lowland** أو جبالاً أو سهول ساحلية

دورات متكررة من التتابعات الطبقيّة ، والتي تتدرج فيها الرواسب عند القاعدة من طبقات خضنة الحبيبات ذات تطبيق متقاطع كبير إلى طبقات أدق في حجم الحبيبات ذات تطبيق متقاطع صغير ، ثم إلى طبقات أفقية عند القمة . وتتكون هذه الرواسب عند حركة النهر جانبياً على قاع الوادي . كما يمكن استخدام تتابعات طبقية مميزة أخرى لمعرفة ظروف الترسيب عند خط الشاطئ وفي البحر العميق (وستناقش هذه التتابعات في الفصل التاسع) .

وترتبط التراكيب الرسوبية ببيئات الترسيب التي تكونت فيها . فالشكل الهندسي للتطبيق المتقاطع في رمال الصحراء يعكس الاتجاه السائد للرياح أثناء الترسيب ، بينما يقتصر وجود التطبيق المتدرج على رواسب المنحدر القارئ والبحر العميق . حيث يتم

coastal plains أو محيطات قليلة العمق أو محيطات عميقة .

• النشاط الجوى .

وتشمل العمليات الجيولوجية المؤثرة على بيئة الترسيب طبيعة التيارات التى تنقل وترسب الرواسب مثل الماء أو الريح أو الجليد ، والأوضاع التكوينية التى قد تؤثر على الترسيب ودفن الرواسب ، ووجود نشاط بركانى . وهكذا، فإن البيئة الشاطئية مثلاً ، تجمع بين ديناميكية الأمواج التى تقترب وتتكرر على الشاطئ والتيارات الناتجة عنها وتوزيع الرواسب على الشاطئ .

وترتبط بيئات الترسيب بكل من تكتونية الألواح والمناخ ؛ حيث ترتبط رواسب الطمي السميكة بالجبال المتكونة نتيجة تصادم القارات ، كما توجد الخنادق العميقة في المحيطات عند نطاقات الاندساس . وتوجد بيئات ترسيب الطمي أيضاً على امتداد حواف وديان الخسف rift valleys فوق القارات . أما بالنسبة للمناخ فإن بيئة الصحراء محتم وجود مناخ جاف قاحل ، بينما تحتاج البيئة الجليدية لمناخ بارد .

ويجب التنويه إلى أن بيئة الترسيب قد تكون موضعاً للترسيب أو موضعاً للتعرية . ويمكن القول بصفة عامة أن البيئات القارية (تحت الهوائية) تعد نموذجاً لمناطق تسودها عمليات التعرية أساساً ، بينما تمثل البيئات البحرية (تحتائية) نموذجاً لمناطق تسودها غالباً عمليات الترسيب . وهناك أيضاً بعض البيئات الانتقالية التى تتحول من التعرية إلى الترسيب خلال فترة زمنية واحدة ، مثل بيئة وديان الأنهار .

وقد كان تأثير الإنسان شديداً في بعض البيئات . حيث قام ببناء حواجز لصد الأمواج وحماية الشواطئ ، مما أدى إلى تغير شكل الشواطئ كثيراً . كما تغيرت

البيئات الجافة القاحلة إلى بيئات رطبة في داخل وحول بعض المدن مثل بعض مدن المملكة العربية السعودية ، بسبب نقل المياه أو تحليتها لاستخدامها في زراعة الصحراء . كما قد تتوسع البيئات الصحراوية لتشمل بيئات مجاورة لها أقل جفافاً . كما قد تتغير بيئات المجارى المائية بسبب إنشاء السدود أو شق القنوات الصناعية . وقد يتغير التركيب الكيميائى للمياه في البحيرات وشواطئ المحيطات نتيجة صرف المياه الملوثة فيها .

وتصنف بيئات الترسيب إلى بيئات قارية تقع فوق القارة ، وبيئات خط الشاطئ وتقع بالقرب من الشواطئ ، وبيئات بحرية وتقع في المحيطات (شكل 22.7 وجدول 4.7).

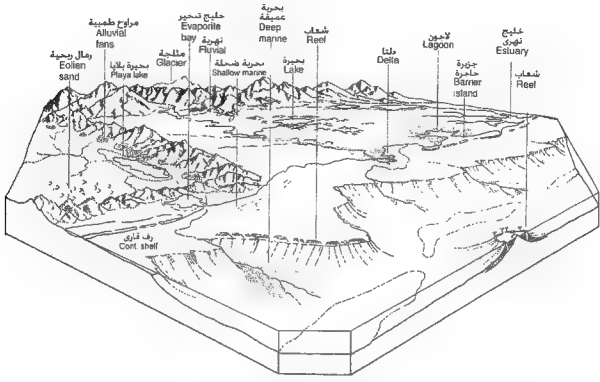
وفيما يلي وصف لهذه البيئات:

أ. البيئات القارية

تتنوع بيئات الترسيب التى توجد على القارات ، بتنوع درجات الحرارة وهطول الأمطار على سطح الأرض . وتتواجد البيئات القارية continental environments (تعرف أيضاً بالبيئات الأرضية terrestrial environments) حول الأنهار وفي الصحارى والبحيرات والمناخ .

وفيما يلي وصف مختصر لأنواع البيئات القارية المختلفة:

1- البيئة النهرية fluvial environment وتعرف أيضاً بالبيئة الطميية alluvial environment ، وتشمل مجرى النهر وحوافه ومسطح الوادى على جانبيه ، والذي يغطي بالماء أثناء الفيضان . وحيث إن الأنهار توجد دائماً على القارات ، فإن الرواسب الطميية تنتشر على القارات . وتتواجد الكائنات الحية بوفرة في رواسب الفيضان الطينية ، مما يؤدي إلى تكون الرواسب العضوية . وتتراوح المناخات من الجاف إلى الرطب .



شكل (22.7). بيئات الترسيب الحديثة .

الطمية alluvial fan فهي عبارة عن جسم من الرواسب الطمية التي تشبه المروحة ، وتكون عندما ينساب مجرى مائى فى وادٍ شديد الانحدار يتحول فجأة إلى سهل طمىي أو وادٍ مستو القناع، مما يؤدي إلى حدوث الترسيب .

3- بيئة البحيرات lake environment وهي بيئة تتحكم فيها تيارات المياه العذبة أو المالحة، الضعيفة أو المتوسطة القوة داخل البحيرة . وقد تكون بحيرات المياه العذبة أماكن للترسيب الكيميائي لمواد عضوية و كربونات . أما البحيرات المالحة ، مثل تلك التي توجد في الصحراء ، فإنها تتبخر وترسب مجموعة متنوعة من معادن المتبخرات مثل الهاليت والجبس .

2- البيئة الصحراوية desert environment وهي بيئة جافة وقاحلة . وتتكون الرواسب في هذه البيئة بفعل الرياح ، بالإضافة لعمل الأنهار التي تفيض موسميا . وحيث إن المناخ الجاف القاحل يقلل من نمو الكائنات الحية ، فإن تأثيرها يكون محدودا على الرواسب التي تتكون في هذه البيئة . وتشير الكثبان الرملية إلى بيئة رملية خاصة .

وتشمل البيئة الصحراوية بالإضافة للكثبان الرملية بحيرات البلايا والمرائح الطمية . أما بحيرات البلايا playa lakes فهي بحيرات دائمة أو مؤقتة تشغل الوديان أو الأحواض الجافة (القاحلة) ، وعندما يتبخر ماؤها تصبح بلايا playas ، وهي طبقات مسطحة من الصلصال تغطيها أحيانا قشرة من الأملاح . أما المروحة

- 4- البيئة الجليدية glacial environment وهى بيئة تتأثر بديناميكية حركة كتل الجليد ، كما تتميز بالمناخ البارد ووجود الحياة النباتية والتي يكون تأثيرها محدود على الرواسب التى تتكون فيها . كما تتكون عند الحافة المنصهرة للمثلجة بيئة طميية انتقالية فى مجارى الماء المنصهر .
- 2- بيئة مسطح المد والجزر tidal flat environment حيث تسود تيارات المد والجزر مساحات واسعة مكشوفة فى وقت الجزر .
- 3 - بيئة الشاطئ beach environment وتتميز بنشاط الأمواج القوية التى تقترب من الشاطئ وتتكرر عليه ، وتعمل على توزيع الرواسب على الشاطئ . وترسب فى هذه البيئات أشرطة من الرمل والحصى بفعل الأمواج .

ب. بيئات خط الشاطئ

- 4 - بيئة الخليج النهري (مصب النهر) estuary ، وهى البيئة التى تنشأ عند مصب النهر. وتتكون هذه البيئة فى المناطق الضحلة القريبة من الشاطئ ، حيث يوجد مسطح مائى مغلق يصب فيه نهر ، يعمل على تخفيض درجة ملوحة الماء داخل المسطح المائى بشكل تدريجى .
- 1 - بيئة الدلتا deltaic environment وتكون عند التقاء الأنهار بالبحيرات أو البحار .

- 5 - بيئة البحيرات الشاطئية (اللاجون) ، حيث يتكون اللاجون lagoon من منطقة مستطيلة ضحلة من البحر ، تفصل عنه بجزر حاجزة barrier islands .

جدول (4.7): بيئات وعوامل الترسيب وأنواع الرواسب المميزة لكل منها .

البيئة	عامل النقل والترسيب	الرواسب
قارية Continental		
نهرية (طميية) Fluvial	أنهار	رمل وجرول وطين
صحراوية Desert	رياح	رمل وتراب
بحيرية Lake	تيار وبحيرات وأمواج	رمل وطين ومواد عضوية ومتبخرات
جليدية Glacial	جليد	رمل وجرول وطين
خط الشاطئ Shoreline		
دلتاوية Deltaic	نهر + أمواج ومد وجزر	رمل وطين
مسطحات المد والجزر Tidal flats	تيارات المد والجزر	رمل وطين
شاطئية Beach	أمواج ومد وجزر	رمل وجرول
خليج نهري Estuary	أنهار وأمواج	رمل وطين
بحيرات شاطئية (لاجون) Lagoon	أمواج	رمل وطين ومتبخرات

البيئة	عامل النقل والترسيب	الرواسب
بحرية Marine		
رف قارى Continental shelf	أمواج ومد وجزر	رمل وطين
حافة قارية Continental margin	تيارات محيط	طين ورمل
الشعاب العضوية organic reefs	الكائنات الهيكلية وبعض الطحالب	شعاب وتراكيب كربونانية ورمال جيرية
بحر عميق Deep sea	تيارات محيط وترسيب	طين

ج- البيئات البحرية

تشمل البيئات البحرية marine environments عددا من البيئات الأصغر subenvironments . وتصنف البيئات البحرية عادة على أساس عمق المياه ، كما تقسم أيضا بناءً على المسافة التي تفصلها عن اليابسة إلى البيئات التالية:

1- بيئات الرف القارى continental shelf environments وتوجد في المياه الضحلة البعيدة عن الشواطئ القارية ، حيث تتحكم التيارات المعتدلة نسبياً في عملية الترسيب . وقد تتكون رواسب فتاتية عند وجود مصدر للفتاتيات ، أو كيميائية عند وجود كائنات حية ذات هيكل جيري ، أو متبخرات عند وجود بخر كثيف للماء .

2- بيئات الحافة القارية continental margin environments وتوجد في المياه العميقة عند حواف القارات ، حيث تتكون الرواسب بفعل تيارات التعكير turbidity currents .

3- الشعاب العضوية organic reefs وتتكون من تراكيب كربونانية قامت ببنائها الكائنات الحية التي تفرز الكربونات ، على الرفوف القارية أو على الجزر المحيطية البركانية .

4- بيئات البحر العميق deep-sea environments وتضم كل قيعان المحيطات العميقة البعيدة عن القارات ، حيث تعكر تيارات المحيط أحيانا المياه الهادئة . وتضم هذه البيئات

الخنادق العميقة deep trenches في المحيطات، والتي تتواجد عند نطاقات الاندساس ، وحيود وسط المحيط mid - ocean ridges والتي تقع فوق حدود الألواح المتباعدة ، وسهول الأعماق abyssal plains المسطحة ، التي تكونت نتيجة تيارات التعكير التي تحركت بعيدا عن حواف القارات .

ويشير تعدد البيئات المتواجدة على سطح اليابسة إلى أن هناك عدداً لا نهاية له من بيئات الترسيب ، ولكن ليس هناك بيتان متماثلتان تماماً ، كما تتداخل البيئات المختلفة مع بعضها البعض فوق سطح الأرض .

د. السحنات الرسوبية : تواجد مجموعة من البيئات الرسوبية مع بعضها بعضا

تعكس التتابعات الطبقيّة الرأسية التغير في ظروف الترسيب عبر الزمن ، بينما يعكس التغير الأفقى في مكونات الطبقة الواحدة التغير في بيئات الترسيب القديمة من موضع لآخر في الزمن نفسه . فعلى سبيل المثال : تترسب الرمال الخشنة قرب الشاطئ ، ويقل حجم الحبيبات كلما اتجهنا بعيدا عنه ، كما تترسب الرواسب الكربونانية في الأعماق الأكبر . وهكذا تترسب رواسب مختلفة النوعية ، ولكنها متجاورة في وقت واحد (شكل 23.7) . وتتميز كل وحدة من هذه الوحدات بمجموعة من الخصائص التي تعكس

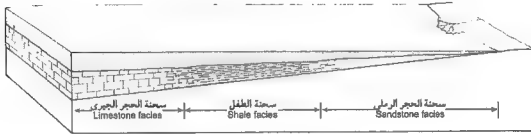
وعلى هذا الأساس ، تصنف بيئات الترسيب عامة إلى مجموعتين رئيسيتين ، هما: بيئات الترسيب الفتاتية ، وبيئات الترسيب الكيميائية والحيوية .

VI. الترسيب وتكتونية الألواح

تأتي الطاقة المؤثرة في عملية الترسيب أساساً ، من مصدرين رئيسيين هما حرارة الأرض الداخلية

ظروف الترسيب ، ويستخدم مصطلح **facies** لوصف تلك المجموعات من الرواسب .

ويمكن تعريف السحنة الرسوبية **sedimentary facies** بأنها مجموعة الخصائص الصخرية والحيوية التي تميز أى راسب موجود في جزء محدود المساحة من وحدة رسوبية ، ويمكن تمييزه عن خصائص غيره من الرواسب المزامنة له ، التي ترسبت في بيئة رسوبية



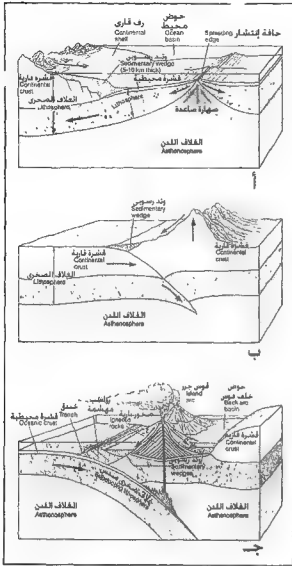
شكل (23.7): عند تتبع طبقة رسوبية جانبياً نجد أنها تتكون من أنواع مختلفة من الصخور ، ويرجع ذلك إلى وجود أنواع عديدة من بيئات الترسيب على امتداد منطقة أنفية في الوقت نفسه . ويستخدم مصطلح "سحنة facies" لوصف هذه المجموعات من الصخور الرسوبية . وتتنفر كل سحنة إلى الأخرى جانبياً بشكل تدريجي .

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An Introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York) .

والشمس . وتعمل الطاقة الحرارية الداخلية في الأرض ، والتي تعتبر المصدر الأساسي للطاقة في تكتونية الألواح ، على تحريك الغلاف الصخري وكذلك رفع الأرض . ويتقلل الراسب الناتج عن عملية تجوية وتعرية الصخور الموجودة في المناطق العالية عبر المنحدرات إلى البحر ، ثم في النهاية إلى المحيط تحت تأثير الجاذبية الأرضية . وتعتبر المجارى المائية والمثلج وأمواج وتيارات المحيط عوامل نقل رئيسية للرواسب ، وهي جزء من الدورة المائية التي تستمد طاقتها من الإشعاع الشمسي .

مختلفة . وتتميز السحنة بمجموعة من الخصائص مثل : حجم الحبيبات وشكلها ، ولون الصخر وتركيبه المعدني والكيميائي ، والتركيب الرسوبية ، والمحتوى الحفري .

وتتميز بيئات الترسيب بأنواع السحنت المتواجدة بها . فتكون معظم رواسب البيئات النهرية (الطينية) فتاتية ، بينما تكون معظم رواسب الشعاب المرجانية وبيئات الرصيف القاري الكربوناتي ضحلة العمق رواسب كيميائية وكيميائية حيوية . ولذلك ، فإن بعض الجيولوجيين يقسمون البيئات الرسوبية طبقاً للمجموعة السائدة في الترسيب .



وتكون معدلات الترسيب عالية بالقرب من المناطق العالية والنشطة تكتونيا، بينما تقل هذه المعدلات كثيرا في المناطق الداخلية من القارات الثابتة نسبيا، كما تكون أقل كثيرا في البحار العميقة التي تكون بعيدة عن مصادر الرواسب الأرضية. وفي المناطق النشطة تكتونيا، تزيد معدلات الرفع عن معدلات التعرية، مما يجعل سلاسل الجبال المرتفعة ملامح بارزة على سطح الأرض. وتوضح الصخور الرسوبية البحرية المكتشفة عند قمة جبل إفرست في سلسلة جبال الهيمالايا أن هذه الرواسب رفعت نحو 9 كم على الأقل بعد ترسيبها منذ نحو 100 مليون سنة مضت في بحر ضحل. وهذا يؤكد أن الرواسب القديمة التي ترسبت على قاع المحيط قد تحولت إلى صخور أضيفت إلى القارة ورفعتها القوى التكتونية.

وتوجد تراكبات طبقية سمكية للغاية في مواضع تكتونية معينة على الألواح، فيؤدى مثلا انشطار القارات عند مراكز الانتشار (الحدود المتباعدة) إلى تراكم أوتاد رسوبية sedimentary wedges على امتداد الحواف القارية الجديدة نتيجة نقل الرواسب بواسطة المجارى المائية إلى حوض المحيط المستمر في النمو والتزايد. وتمثل حافة المحيط الأطلنطى عند أمريكا الشمالية مثالا لهذه العملية (شكل 24.7أ). ويتكون جزء كبير من الطبقات السمكية المتراكمة تحت الرف القارى من صخور رسوبية بحرية ضحلة؛ مما يدل على أن هذا الوتد الرسوبى قد هبط ببطء أثناء عملية التراكم.

كما قد تتراكم الرواسب بالمجارى المائية في سلسلة جبال صاعدة في أحواض ترسيب مجاورة لنطاقات تصادم القارات continental collision zones (شكل 24.7 ب). وتمثل سلسلة قوس جبال الهيمالايا-هندوكوش Himalaya-Hindu Kush mountain arc في جنوب ووسط آسيا مثالا واضحا لذلك.

شكل (24.7): الرواسب وتكتونية الألواح، أمثلة لتراكبات سمكية من الرواسب في مواضع تكتونية مختلفة من الألواح:

(أ) يتراكم وتد سميك من الرواسب ببطء على امتداد حافة قارية جديدة تكونت نتيجة انشطار قارة عند مركز انتشار spreading center حيث تباعدت كتلتان قاربتان.

(ب) في نطاق تصادم قارى continental collision zone، يتراكم الراسب من سلسلة جبال صاعدة ليكون وتدا سميكاً (ج) يتساقط الراسب في خندق بحرى عميق من قارة مجاورة، يملأها قوس من يراكين نشطة ليكون وتدا من الرواسب، يحشر ويسحق أثناء اندساس لوح محيطى.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

لتلك الأحزمة التكتونية. وعندما يقترب اللوح المحيطي ببطء من الحافة القارية، تحشر الرواسب وتسحق على امتداد القارة وتصبح جزءاً من القارة. ويعاد تدوير الرواسب بهذه الطريقة من القارة إلى المحيط، ثم مرة أخرى إلى القارة، حيث يسبب الرفع المستمر بدء العملية من جديد وتكرار هذه الدورة.

وتتساقط الرواسب في الحنادق المحيطية العميقة على امتداد نطاقات الاندساس subduction zones النشطة بالقرب من الحواف القارية وتتراكم بمعدلات عالية لتتكون تبايعات سمكية، كما هو الحال على امتداد الحافة الغربية لأمريكا الجنوبية (شكل 24.7 ج). وتشمل الرواسب الفتاتية المتراكمة نسبة عالية من الفتات البركاني، حيث تكون البراكين عادة مصاحبة

الملخص

1. تتكون الرواسب من الحبيبات الفتاتية والأيونات الذائبة نتيجة عمليات التجوية الطبيعية والكيميائية والتعرية، وتحمل تيارات الماء والرياح والجليد هذه المواد إلى مكان استقرارها النهائي حيث موقع الترسيب. وينتج الترسيب، الذي هو عبارة عن هبوط الحبيبات واستقرارها من الوسط الناقل، لتتكون رواسب طباقية في مجارى مياه الأنهار والوديان، وعلى الكتلان الرملية وعند حواف وقيعان المحيطات.
2. تؤدي عمليات ما بعد الترسيب، وخاصة عمليات التصخر إلى تصلد الرواسب وتحولها إلى صخور رسوبية بعد أن تدفن تحت رواسب إضافية.
3. تنقسم الرواسب والصخور الرسوبية إلى قسمين رئيسيين، هما: الرواسب الفتاتية، والرواسب الكيميائية والكليائية الحيوية.
4. تتكون الرواسب الفتاتية من فتات الصخور الأصلية التي تعرضت للتجوية الطبيعية (الفيزيائية)، بينما تتكون معادن الصلصال بالتجوية الكيميائية. وتحمل تيارات المياه والرياح والجليد تلك النواتج الصلبة إلى المحيطات، وأحياناً لا تصل إلى المحيط وإنما ترسب خلال مسار انتقالها.
5. تتكون الرواسب الكيميائية والكيميائية الحيوية من الأيونات الذائبة في الماء أثناء التجوية الكيميائية. وتنقل هذه الأيونات في المحاليل إلى المحيطات وتختلط مع ماء البحر؛ حيث ترسب نتيجة للتفاعلات الكيميائية والكيميائية الحيوية.
6. تصنف الرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية طبقاً لحجم الحبيبات إلى جروول وكونجولمرات أو بريشيا ورمال وحجر رملي وطين وحجر طين وطفل. وتعكس هذه الطريقة في تصنيف الرواسب أهمية قوة التيار أثناء نقل وترسيب المواد الصلبة.
7. تصنف الرواسب والصخور الرسوبية الكيميائية والكيميائية الحيوية على أساس تركيبها الكيميائي إلى أنواع عديدة أهمها صخور الكربونات والحجر الجيري وحجر الدولوميت. ويتكون الحجر الجيري في معظمه من أصداف ترسبت بطريقة كيميائية حيوية. ويتكون حجر الدولوميت نتيجة تغيرات ما بعد الترسيب للحجر الجيري. وتشمل الرواسب الكيميائية والكيميائية الحيوية أيضاً المتبخرات والرواسب السيليكية (مثل التشرنت) والفسفوريت ومتكونات الحديد والحث، بالإضافة إلى مواد عضوية أخرى تحولت إلى فحم ونفط وغاز.

راسب موجود في جزء محدود من وحدة رسوبية تميزه عن غيره من الرواسب المتزامنة له والتي ترسبت في بيئات رسوبية مختلفة في الوحدة نفسها .

11. تكون معدلات الترسيب عالية بالقرب من المناطق المرتفعة والنشطة تكتونيا ، بينما تقل هذه المعدلات كثيرا في المناطق الداخلية من القارات والثابتة تكتونيا ، كما تكون أقل كثيرا في البحار العميقة ، والتي تكون بعيدة عن مصادر الرواسب الأرضية .

8. تتكون التراكيب الرسوبية أثناء ترسيب أو بعد ترسيب الصخور الرسوبية بفترة قصيرة ، وعمدنا تلك التراكيب بأدلة تفسر كثيرا من الظواهر الترسيبية والبيئية القديمة ، وهي تشمل التطبيق والتطبيق المتقاطع والتطبيق المتدرج وعلامات النيم وتراكيب التقلب الحيوى وتشققات الطين والتتابعات الطبقة .

9. تصنف بيئات الترسيب إلى بيئات قارية وبيئات خط الشاطئ وبيئات بحرية .

10. تعرف السحنة الرسوبية بأنها مجموعة من الخصائص الصخرية والحيوية التي تميز أى

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

<http://walrus.wr.usgs.gov/seds/>
http://www.isgs.uiuc.edu/dinos/dinos_home.html
<http://www.kalbab.org/home.htm>

المصطلحات المهمة

bedding (=stratification)	تطبق	mud cracks	تشققات الطين
biochemical sediment, rock	راسب أو صخر كيميائي أو حيوي	mudstone	حجر الطين
bioclastic particles	حبيبات فتاتية حيوية	oil	زيت
bioturbation	تقليب (اضطراب) حيوي	organic sediment, rock	راسب أو صخر رسوبي عضوي
boulder	جلمود (ج. جلايد)	peat	خث (بيت)
carbonate platform	رصيف كربوناتي	pebbles	حصى
carbonate sediment, rock	راسب أو صخر كربوناتي	phosphorite	فوسفوريت
cementation	تلاحم	porosity	مسامية
chemical sediment, rock	راسب أو صخر كيميائي	recrystallization	إعادة التبلور
chert	تشرت	reefs	شعاب
clastic sediment, rock	راسب أو صخر فتاتي	ripple marks	علامات تيم
cobbles	حصى كبير	roundness	استدارة
compaction	كيس (اندماج)	sand	رمل
conglomerate	كونجلومرات	sandstone	حجر رملي
cross-bedding	تطبق متقاطع	sediment	راسب
depositional environment	بيئة الترسيب	sedimentary basin	حوض رسوبي
diagenesis	تغيرات ما بعد الترسيب	sedimentary breccia	بريشيا رسوبية
dolostone	حجر الدولوميت	sedimentary environment	بيئة رسوبية
evaporite sediment, rock	راسب أو صخر رسوبي تبخري	sedimentary facies	سحنة رسوبية
evaporites	متبخرات	sedimentary rock	صخر رسوبي
facies	سحنة	sedimentary structures	تراكيب رسوبية
flint	صوان	shale	طفل
Foraminifera	فورامينيفرا	silt	غرين
gas	غاز	siltstone	حجر الغرين
graded bedding	تطبق متدرج	sorting	الفرز
gypsum	جبس	stratification	تطبق
iron formation	متكوّن حديد	sphericity	تكور
limestone	حجر جيرى	stratum (pl. strata)	طبقة (ج. طبقات)
lithification	تصخر	subsidence	هبوط
marine evaporite sediment, rock	راسب أو صخر بحري تبخري	turbidites	عكاويات
marine evaporites	متبخرات بحرية	turbidity current	تيار العكر
mud	طين	well sorted	جيد الفرز

الأسئلة

1. كانت تجوية القارات أكثر انتشاراً وشدة في العشرة ملايين سنة الأخيرة من عمر الأرض عنها في الفترات المبكرة من عمرها. كيف تنعكس هذه الملاحظة على الرواسب التي تغطي سطح الأرض الآن ؟
2. متى يعتبر الرماد البركاني المتساقط من الرواسب ؟
3. ورد في أحد التقارير الجيولوجية أن الحجر الرمل بمنطقة ما قد استمد ونشأ من صخر الجرانيت . ما المعلومات التي تم جمعها لكى تؤدى إلى هذه النتيجة ؟
4. إذا كنت تنظر إلى قطاع في حجر رمل به تطبيق متقاطع. ما التركيب الرسوبى الذى يدل على اتجاه التيار الذى أدى إلى ترسيب الحجر الرمل ؟
5. ما الظروف التى تؤدى إلى تكوّن التطبيق في الراسب أو الصخر الرسوبى ؟
6. كيف يمكن التفرقة بين الراسب المتكون بواسطة المياه الجارية ، والراسب المتكون بواسطة الرياح أو في بحيرة ؟
7. إذا كان هناك تتابع متطبق في منطقة ما بها صخر كونجلومرات عند القاعدة ، يتدرج لأعلى إلى حجر رمل ثم إلى طفل فحجر جبرى مكوّن من رمل كربوناتي تلاحت حبيباته بالجبر . ما التغيرات التى حدثت في منطقة الصخر المصدر أو بيئة الترسيب وتكون مسئولة عن ترسيب هذا التتابع ؟
8. في تتابع من القاعدة للقمّة ، يبدأ بحجر جبرى فتأتى عضوى متطبق ، يليه حجر جبرى مكوّن من كائنات عضوية متلاحمة بالجبر ، تضم طحالب موجودة طبيعياً مع المرجان ، وينتهى بطبقات من
- الدولوميت . اذكر بيئات الترسيب التى أدت إلى تكوين هذا التتابع .
9. في أى بيئات الترسيب تتوقع وجود الطين الجبرى ؟
10. اذكر العمليات التى تؤدى إلى تحول الراسب إلى صخر رسوبى .
11. لماذا يعتقد أن البترول ينشأ من الرواسب البحرية ؟
12. كيف يمكن استخدام حجم ودرجة فرز حبيبات الرواسب للتمييز بين الرواسب المتكونة في بيئة جليدية ، وتلك المترسبة في بيئة صحراوية ؟
13. صف رمال الشاطئ المتوقع وجودها نتيجة ضرب الأمواج لسلسلة من الجبال الشاطئية المكونة في معظمها من البازلت .
14. ما الدور الذى تلعبه التيارات الناقلة في نشأة بعض أنواع الحجر الجبرى ؟
15. اذكر اسم الصخر الرسوبى الذى يتكون أساساً نتيجة عمليات ما بعد الترسيب ، والذي لا يوجد له مقابل كراسب أولى .
16. ما الأماكن التى يمكن أن توجد بها الشعاب ؟
17. إذا كان هناك شرم محيطى منفصل عن المحيط المفتوح وله مدخل ضحل . اذكر أنواع الرواسب التى يمكن أن تتكون على قاع الشرم ، إذا كان المناخ دافئاً جافاً ، ونوعها إذا كان المناخ بارداً رطباً .
18. ما أوجه التشابه بين كل من التشرت والحجر الجبرى من حيث النشأة ؟
19. اشرح أين تتوقع وجود تراكبات ضخمة بشكل استثنائى من الصخور الرسوبية ، ولماذا ؟

الفصل

8

الصخور المتحولة : صخور جديدة من أخرى سابقة

- أ. حدود التحول
- II. العوامل الطبيعية والكيميائية التي تتحكم في عملية التحول :
- أ. درجة الحرارة
- ب. الضغط
- ج. التغيرات الكيميائية أثناء التحول
- III. أنواع التحول :
- أ. التحول الإقليمي
- ب. التحول التماسي (الحرارى)
- ج. التحول التهشمي
- د. التحول الحرمائي
- هـ. التحول بالدفن
- IV. أنسجة التحول :
- أ. الأنسجة المتوقعة :
1. الاردواز
2. الفيليت
3. الشست
4. النيس
- ب. الأنسجة غير المتوقعة (الجرانوبلاستية) :
1. الهورنفلس
2. الكوارتزيت
3. الرخام
4. الأرجليت
5. الحجر الأخضر
6. الأمفيبوليت
7. الجرانوليت
8. السربستيت
9. حجر الصابون
- ج. أنسجة البلورات الكبيرة (بورفيروبلاست)

د . أنسجة التشوه (الطحن)

٧. التحول الإقليمي ورتبة التحول :

أ. أيزوجراد (خط تساوي رتبة التحول): عمل خرائط

لنطاقات التحول

ب. رتبة التحول وتركيب الصخر الأصلي

ج. سمكات التحول

٧١. نطاقات التحول بالتماس :

أ. هالات التحول (هالات التماس)

ب. رتبة التحول وتركيب الصخر الأصلي

٧٢. التحول وتكتونية الألواح

المستمدة من النشاط الناري . ويتناول هذا الفصل أسباب التحول وأنواعه ، وأصل الأنسجة المختلفة التي تميز الصخور المتحولة ، والعلاقة بين التحول وتكتونية الألواح .

1- حدود التحول

قبل مناقشة عملية التحول بالتفصيل ، يتحتم أن نعين حدود عملية التحول . حيث يصف التحول التغيرات التي تحدث في التركيب المعدني ونسيج الصخور الرسوبية والمتحولة التي تعرضت لدرجات حرارة أعلى من 200 م° ، وضغوط أعلى من 300 ميجا باسكال (الضغط الناتج عن عدة آلاف من الأمتار بسبب الصخور التي تعلوها، ووحدة الضغط هي الباسكال Pa ، وللسهولة يستخدم أحياناً 1 مليون باسكال - ميجا باسكال أو Mpa كوحدة). ولا يشمل التحول التغيرات التي تحدث نتيجة التجوية أو عمليات ما بعد الترسب diagenesis ، لأن كلاً من التجوية وعمليات ما بعد الترسب تحدث عند درجات حرارة أقل من 200° وضغط أقل من 300 ميجا باسكال .

وهناك بالطبع حد أعلى للتحول ، يحتم ضرورة أن يحدث التحول والصخور في الحالة الصلبة . أما إذا ارتفعت درجات الحرارة إلى مستويات أعلى ، فإنه يحدث انصهار جزئي للصخور وتكون صخور نارية. ويكون الحد الأعلى للتحول في القشرة عند درجة حرارة نحو 900 م°. ويمثل هذا الحد بداية الانصهار الجزئي الرطب للصخور ، حيث تحتوى معظم الصخور على كمية قليلة من الماء (شكل 1.8) . وتحكم نوعية الصخور المنصهرة وكمية الماء في درجة الحرارة التي يبدأ عندها الانصهار الجزئي ، وكذلك في

نشاهد في حياتنا اليومية كيف تؤثر درجة الحرارة على المواد المختلفة . فاللحم المشوي يحتوى على مواد كيميائية مختلفة تماماً عن تلك الموجودة في اللحم النيء . كما أن الطهي في قدر الضغط لا يؤثر على الطعام بالحرارة فقط ، ولكن بالضغط أيضاً . وبطريقة مماثلة ، فإن درجات الحرارة والضغط المرتفعين في أعماق القشرة الأرض تؤدي إلى تحول الصخور، ولكنها لا تكون مرتفعة بدرجة تكفي لانصهار الصخور.

ويسودى الارتفاع في درجات الحرارة والضغط والتغير في البيئة الكيميائية إلى تغير التركيب المعدني وأنسجة تبلور الصخور الرسوبية والنارية ، على الرغم من بقاء تلك الصخور في الحالة الصلبة طوال عملية التحول ، وتسمى الصخور المتكونة بالصخور المتحولة **metamorphic rocks** . ويحدث التحول في شكل الصخر ، بسبب حدوث تغيرات في التركيب المعدني أو النسيج أو التركيب الكيميائي أو في الثلاثة معاً . فمثلاً ، قد يتحول صخر الحجر الجيري الغني بالحفريات إلى صخر رخام أبيض لا يوجد به أى أثر للحفريات . وقد يبقى صخر ما مكون أصلاً من بلورات صغيرة من الكالسيت دون تغير في التركيب المعدني أو التركيب الكيميائي ، ولكن قد يحدث التغير في النسيج بدرجة كبيرة حيث يتكون صخر به بلورات كبيرة متداخلة . وقد يتغير الطفل وهو صخر جيد التطبيق دقيق التجب لدرجة أنه لا يمكن رؤية حبيبات المعدن بالعين المجردة ، إلى شكل ينطمس فيه التطبيق وتتكون بلورات كبيرة من الميكسا تتلألأ في ضوء الشمس . وفي هذا التحول ، يتغير التركيب المعدني والنسيج كلية ، بينما يبقى التركيب الكيميائي العام للصخر دون تغير . وقد تتغير بعض الصخور من خلال تغير التركيب المعدني والنسيج والتركيب الكيميائي ، حيث يحدث التغير بالحرارة والسوائل

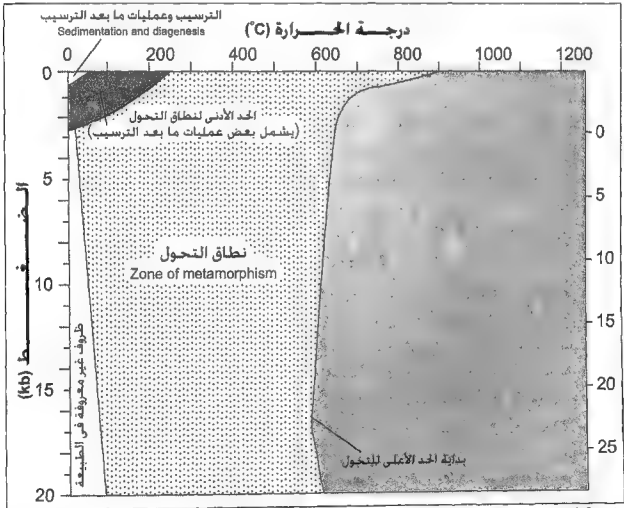
نطاقات الاندساس أو عند حواف الألواح التكتونية المتصادمة .

وهكذا ، يستخدم مصطلح التحول metamorphism (مشتق من meta بمعنى تغير و morphe بمعنى شكل) لوصف كل التغيرات التي تحدث في التركيب المعدني ونسيج الصخر وهما في الحالة الصلبة في القشرة الأرضية ، بسبب التغير في درجة الحرارة والضغط ، واللذان يكونان أعلى من تلك الموجودة عند السطح ، ولكنها أقل من درجة الحرارة التي تنصهر عندها تلك الصخور .

وتضم المعادن السيليكاتية والتي تميز التحول - أى يدل وجودها على أن الصخر قد تعرض للتحول -

كمية الصهارة التي يمكن أن تتكون من الصخر المتحول . ولذلك تبقى بعض أنواع الصخور في الحالة الصلبة عند 900° أو حتى أكثر ، وعندما توجد كمية صغيرة من الماء فإنه يحدث انصهار لكمية صغيرة من الصخور ، ويبقى الصهير محبوساً مثل جيوب صغيرة في الصخر المتحول .

وعندما تتكون كميات كبيرة من الصهارة نتيجة الانصهار الجزئي ، فإنها تصعد إلى أعلى وتتداخل في الصخور المتحولة التي تعلوها وتتصلب لتكوّن صخوراً نارياً متداخلاً . ولذلك ، فإن الباثوليثات المكونة من صخر الجرانيت تتواجد بجوار أجسام ضخمة من الصخور المتحولة والتي ترتبط معا . وتوجد هذه التجمعات من الصخور النارية والمتحولة على امتداد



شكل (1.8). رسم تخطيطي يوضح علاقة درجات الحرارة والضغط بحدود عملية التحول .

(Simplified after Raymond, L.A., 1995: Petrology: The study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic rocks. Wm. C. Brown Publishers).

II. العوامل الطبيعية والكيميائية التي تتحكم في عملية التحول

تؤدي تغيرات التحول إلى أن يدخل صخر ما في اتزان مع ظروف جديدة مغايرة للظروف التي نشأ فيها. فالصخر الرسوبي الذي تكوّن من عمليات ما بعد الترسيب ، يكون في اتزان مع المتوسط العام للضغط ودرجة الحرارة الناشئين عن دفن الرواسب على عمق كيلومترات قليلة . وقد يتكون هذا الصخر أثناء عملية التجبل (بناء الجبال) والتي يتم فيها دفن الصخر الرسوبي على عمق أكبر ويتعرض إلى درجة حرارة تزيد عن 500° ، وبعد مرور وقت كاف - عادة مليون سنة أو أكثر- يتغير التركيب المعدني ونسيج الصخر بحيث يدخل الصخر في اتزان مع درجات الحرارة والضغط الجديدة . وكلما زاد العمق ، وزادت بالتالي درجات الحرارة في القشرة ، كانت تغيرات التحول أسرع .

1 - درجة الحرارة

للحرارة تأثير كبير على التركيب المعدني ونسيج الصخر ، حيث تعمل الحرارة على كسر الروابط الكيميائية ، كما تغير البنية البلورية الموجودة في الصخور النارية. وعندما يتكيف الصخر مع درجة الحرارة الجديدة ، فإن الذرات والأيونات يعاد تبلورها، حيث ترتبط في ترتيبات جديدة لتكوّن تجمعات معدنية جديدة . وتنمو العديد من البلورات الجديدة إلى حجم أكبر من ذلك الذي كان في الصخر الأصلي . وقد يصبح الصخر شريطيا banded نتيجة تجمع المكونات المختلفة في مستويات منفصلة . ومن المعروف أن المعادن المختلفة تتبلور وتبقى مستقرة عند درجات الحرارة المختلفة ، لذلك فإنه يجب عند دراسة الصخور المتحولة، وكما يحدث عند دراسة الصخور النارية ، استخدام تركيب الصخر لتقدير درجة الحرارة التي تكوّن عندها الصخر . وهكذا ، فإن التجمع المعدني

ثلاثة معادن متعددة الشكل لسيليكات الألومنيوم (Al_2SiO_5) هي : الكيانيت والأندالوسيت والسيليمانيت ، بالإضافة إلى معادن البروفيليت والاشتوروليت والإيدوت . وهناك بعض المعادن الأخرى التي تشيع في الصخور المتحولة ، وتكون موجودة أيضا في بعض الصخور النارية، مثل : الجارنت والكوارتز والمسكوفيت والأمفيبول والفلسبار .

ويشير التحول منخفض الرتبة low-grade metamorphism إلى عمليات تحول تحدث عند درجات حرارة تتراوح بين نحو 200°م و 320°م وعند ضغط منخفض نسبيا، بينما يشير التحول عالي الرتبة high-grade metamorphism إلى عمليات تحول عند درجات حرارة أعلى من نحو 550°م وضغط عالي .

وقد تتعرض بعض الصخور المتحولة أثناء تكوّنهما لدرجات حرارة عالية وضغط مرتفع ، فيحدث تحول عالي الرتبة ، ثم تتعرض تلك الصخور المتحولة فيما بعد لضغوط وحرارة أقل فتتحول مرة أخرى تحت الظروف الجديدة ، من صخور متحولة عالية الرتبة إلى صخور متحولة منخفضة الرتبة في عملية تعرف بالتحول التراجعي retrograde metamorphism .

ويحدث معظم التحول في القشرة الأرضية وحتى الحد الفاصل بين القشرة والوشاح . بالإضافة إلى ذلك ، فإن التحول يمكن أن يحدث عند سطح الأرض . حيث تحدث تغيرات التحول في سطح التربة والرواسب المخبزة baked المتواجدة مباشرة أسفل فيوض اللابة البركانية ، بتأثير الحرارة الناشئة عن ملازمة اللابة .

يؤثر على الغواصين في المياه العميقة. ويغير المستويات العالية من الضغط الحابس التركيب المعدني، عن طريق ضغط الذرات مع بعضها بعضا لتكوّن معادن جديدة لها بنية بلورية أكثر كثافة.

- ضغط موجه **directed pressure** يؤثر في اتجاه معين فقط، مثلما نضغط على كرة من الصلصال بين إبهام اليد والسبابة. وتؤدي حركات الألواح المتقاربة إلى نشأة الضغط الموجه، الذي يؤدي إلى تشوه الصخور. وحيث إن الحرارة تقلل من قوة الصخور، فإن الضغط الموجه يسبب طيا شديدا وتشوها للصخور المتحولة في أحزمة بناء الجبال، حيث تكون درجات الحرارة مرتفعة. ويعرف الضغط الموجه أيضا بالإجهاد المتباين **differential stress** أو الإجهاد التضاغطي **compressive stress**.

واعتمادا على نوع الإجهاد الموجه للصخور، يتم ضغط المعادن المتحولة أو استطالتها، أو دورانها لتترتب في اتجاه معين. وهكذا يؤدي الضغط الموجه إلى إعادة ترتيب البلورات المتحولة الجديدة المتكونة أثناء إعادة تبلور المعادن في مستويات معينة تحت تأثير الحرارة والضغط. وأثناء إعادة تبلور الميكسا مثلاً، تنمو البلورات وتتراص مستويات الصفائح في البنية السيليكاتية عموديا على الضغط الموجه. وتترتب المعادن المستطيلة مثل الأمفيولات خطيا في مستويات عمودية على الإجهاد الموجه. ويمكن أن نستخدم المعلومات المستمدة من التجارب العملية عن تغيرات التركيب المعدني والنسيج في التعرف على الضغوط التي كانت تسود في منطقة ما أثناء التحول. وهكذا يمكن استخدام التجمع المعدني في تقدير الضغط أو كباروميتر أرضي.

للصخر المتحول يمكن أن يستخدم كترمويمتر أرضي (مقياس حرارة الأرض) **geothermometer**. ويرجع التغير في درجات حرارة الصخور إلى أسباب عديدة، نذكر منها:

- 1- التداخل الصهاري بالقرب من المنطقة التي يحدث بها التحول، حيث تفقد الصهارة حرارتها أثناء التبلور، وتنقل الحرارة إلى الصخور المحيطة.
- 2- تدرج حرارة الأرض **geothermal gradient**، وهو معدل زيادة درجة حرارة الأرض مع العمق، والذي يختلف من منطقة لأخرى.
- 3- الاضمحلال الإشعاعي **radioactive decay** للعناصر المشعة الموجودة في بعض معادن الصخور النارية، أو بعض العناصر المشعة التي استخلصتها الرواسب من ماء البحر.
- 4- الحرارة المنبعثة من الأعماق خلال الوشاح عن طريق خلايا الحمل الدوراني **convection cells**، والتي تشمل: التيار الصاعد للمواد الساخنة، والتيار المستعرض والتيار الهابط للمواد الباردة.
- 5- الاحتكاك الذي يحدث أثناء تشوه الصخور، خاصة على امتداد الصدوع، ويكون المصدر الحراري في هذه الحالة قليلا.

ب- الضغط

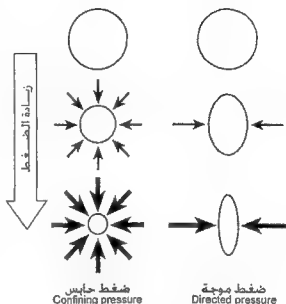
يعمل الضغط على تغيير نسيج الصخر وتركيبه المعدني. ويتعرض الصخر الصلب إلى نوعين أساسيين من الضغط (شكل 2.8)، والذي يسمى إجهادا **stress**:

- ضغط حابس **confining pressure** ويسمى أيضا بضغط الحمل **load pressure**، وهو ضغط عام في كل الاتجاهات، مثل الضغط الذي يؤثر به الغلاف الجوي على سطح الأرض، أو الضغط الذي

دور السوائل في عملية التحول: يحدث عديد من التغيرات الكيميائية والمعدنية أثناء عملية التحول بسبب السوائل التي تتخلل الصخر الصلب . وعلى الرغم من أن الصخور المتحولة تكون في منكشفتها جافة تماما ، وبها مسامية منخفضة للغاية ، إلا أن معظمها يحتوى على سوائل في مسامها (الفراغات بين الحبيبات) التي تكون متناهية الدقة . ويتكون هذا السائل أساسا من الماء المحتوى على ثنائي أكسيد الكربون وكميات ضئيلة مذابة من غازات وأملاح ، وكميات شحيحة من المعادن المكونة للصخر . وتعمل تلك السوائل المتخللة بين الحبيبات على زيادة سرعة التفاعلات الكيميائية أثناء التحول . وحيث إن التغير في درجات الحرارة والضغط يحطم البنية البلورية ، فإن الذرات والأيونات تتحرك بين الصخر والسوائل الموجودة به . وكلما كانت حركة تلك الذرات والأيونات أسرع داخل الصخر ، كانت أقدر على التفاعل مع المواد الصلبة ، وتكونت معادن جديدة .

ويستمد ثنائي أكسيد الكربون الموجود في سوائل الصخور المتحولة أساسا من الصخور الرسوبية (الأحجار الجيرية وأحجار الدولوميت) ، بينما يستمد الماء من الصلصال والمعادن المائية الأخرى ، وليس من الماء الموجود في مسام الصخور الرسوبية ، حيث يتم التخلص من نسبة كبيرة منه خلال عمليات ما بعد الترسيب .

وتتحرك السوائل أثناء عملية التحول على امتداد حدود الحبيبات أولاً ، ثم تتحرك خلال القنوات المفتوحة ، حيث يتكسر الصخر نتيجة ضغط السائل . وتقابل السوائل أثناء صعودها إلى أعلى في القشرة الأرضية صخوراً أكثر برودة مما يؤدي إلى ترسيب الكوارتز في الكسور والشقوق والفجوات وتكون عروق الكوارتز التي تشيع في الصخور المتحولة منخفضة الرتبة .



شكل (2.8): الفرق بين الضغط الموجه والضغط المحابس .

ج - التغيرات الكيميائية أثناء التحول
قد يتغير التركيب الكيميائي لصخر ما أثناء التحول بدرجة ملحوظة ، نتيجة إضافة أو إزالة بعض مكوناته الكيميائية . ومن الشائع أن يؤدي التداخل الصهاري إلى تحولات كيميائية في الصخور المحيطة ، مثل الطفل أو الحجر الجيري ، حيث تصعد السوائل الحارّة من الصهارة محملة بعناصر الصوديوم والبوتاسيوم والسيليكا والنحاس والزنك الذاتية ، بالإضافة إلى عناصر كيميائية أخرى ذائبة في الماء الساخن تحت تأثير الضغط . وربما تستمد هذه العناصر من كل من الصهارة والصخور التي تم التداخل فيها . وأثناء تخلل المحاليل الحارّة الصاعدة للقشرة الأرضية السطحية فإنها تتفاعل مع الصخور التي حدث بها التداخل ، حيث تحدث تغيرات في التركيب الكيميائي والمعدني ، وأحيانا يحل تماما معدن محل معدن آخر دون تغير في نسج الصخر . ويسمى هذا النوع من التغير في تركيب الصخر العام نتيجة نقل السوائل للعناصر الكيميائية داخل أو خارج الصخر بالتحول **metasomatism** (من **meta** بمعنى تغير و **soma** بمعنى عَصير) . ويتكون عديد من الرواسب ذات القيمة الاقتصادية كالتحس والزنك والرصاص وخامات فلزية أخرى بهذا النوع من الإحلال الكيميائي.

المتحولة إلى عدة مجموعات على أساس الظروف الجيولوجية لأصل الصخر. وفيما يلي وصف لهذه المجموعات، بينما يوضح شكل (3.8) علاقة هذه الأنواع بأوضاعها في تكتونية الألواح.

أ - التحول الإقليمي

يعتبر التحول الإقليمي regional metamorphism، أكثر أنواع التحول انتشاراً، حيث تؤثر كل من درجة الحرارة المرتفعة والضغط العالي على أحزمة أو مساحات شاسعة من القشرة الأرضية تصل إلى عشرات الآلاف من الكيلومترات المربعة. وتتغير درجات الحرارة أثناء التحول الإقليمي بدرجة كبيرة. فهي تتراوح بين 300 و 800°م (الحد الأقصى للتحول نحو 900°م)، في حين يتراوح الضغط بين 2 و 6 كيلوبار أو أكثر. ويستخدم هذا المصطلح لتمييز هذا النوع من التحول عن التغيرات المحلية الأخرى، والتي تحدث بالقرب من المتداخلات النارية أو الصدوع. ويحطم التحول الإقليمي بعض أو كل الأنسجة الأصلية للصخور النارية أو الرسوبية، حيث يؤدي إلى تكوين معادن وأنسجة جديدة. وهناك ثلاثة مواضيع تكتونية يتم فيها التحول الإقليمي:

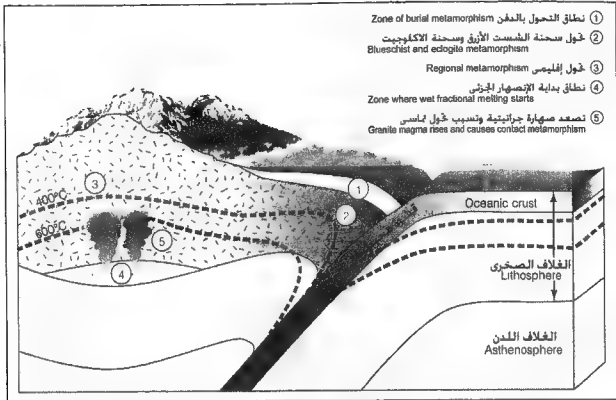
1. الأقواس البركانية حيث تنشأ بعض أحزمة التحول الإقليمي نتيجة درجات الحرارة المرتفعة والضغط المتوسط إلى العالية نتيجة اندساس الألواح المحيطية بعمق في الوشاح والتسخين بالصهارة الصاعدة (شكل 3.8).
2. الخنادق المحيطية، حيث تتكون الأحزمة الأخرى نتيجة الضغط العالي والحرارة المنخفضة نسبياً بالقرب منها، ويسبب الاندساس سحب القشرة المحيطية الباردة نسبياً إلى أسفل.
3. حدود الألواح القارية المتقاربة (المتصادمة)، حيث يحدث التحول الإقليمي تحت ضغوط ودرجات حرارة عالية جداً في المستويات الأعظم من القشرة، ويشبه الصخر وتكون أحزمة جبال مرتفعة.

ومع تقدم عملية التحول تتكسر الروابط الكيميائية بين المعادن وجزئيات الماء، حيث يؤدي التحول إلى انتزاع الماء dehydration أو يتفاعل الماء مع الصخر. فالمعادن التي تحتوي على الماء وتكون موجودة في الصخور الرسوبية تحتوي أصلاً على الكثير من الماء المرتبط بروابط كيميائية، بالإضافة إلى أن الصخر يحتوي على ماء إضافي في المسام. ويُقصد هذان النوعان من الماء أثناء عملية التحول، ويصعد الماء إلى مناطق القشرة الأرضية الضحلة. وكلما ارتفعت رتبة التحول، انخفض محتوى الصخر من الماء. وعلى العكس مما سبق، تأخذ معادن الصخور البركانية المافية، والتي لا تحتوي على ماء في بنيتها البلورية، بعض جزئيات الماء من السوائل الموجودة في المسام خلال المراحل الأولى من التحول. وفي هذا التفاعل، فإن هذه المعادن اللامائية، أي الخالية من الماء، تكون معادن متبلورة جديدة من الميكا والكلوريت ومعادن أخرى مائية - أي تتكون فيها روابط كيميائية بين الماء والمكونات الكيميائية الأخرى.

III. أنواع التحول

تحدث عملية التحول حينما يتعرض صخر لظروف مغايرة لتلك التي نشأ فيها، حيث يصبح الصخر غير مستقر، ويتغير تدريجياً حتى يصل إلى مرحلة اتزان مع ظروف البيئة الجديدة. ويحدث التغير في درجات الحرارة والضغط السائدين في المنطقة الممتدة من عدة كيلومترات تحت سطح الأرض حتى الحد الفاصل بين القشرة والوشاح mantle.

وقد أمكن مؤخراً، واعتماداً على التكنولوجيا الحديثة، إجراء تجارب معملية لمحاكاة ظروف التحول، والمزج بين عاملين أو أكثر من عوامل الضغط والحرارة والتركيبة الكيميائي، والتي قد يحدث عندها التحول. ولقد أدت الملاحظات الحقلية إلى تصنيف الصخور



شكل (3.8): رسم تخيلى لحد لوح متقارب convergent plate boundary يوضح أماكن التحول المختلفة . لاحظ أن الخطوط المقطعة تصل بين نقاط درجات الحرارة المتساوية (الايزوترم isotherm) والتي تعرف بكتورتات درجات الحرارة .

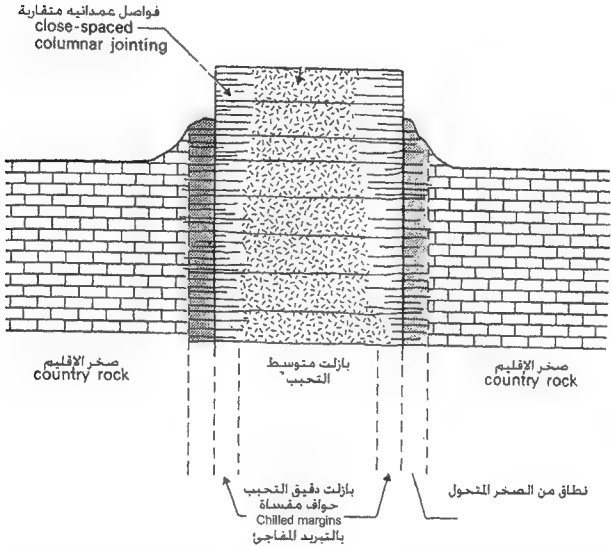
- (1) نطاق التحول بالدفن burial metamorphism .
 - (2) نطاق التحول الإقليمى regional metamorphism تحت الضغوط العالية ودرجات التحول المنخفضة نسبياً (صخور الشست الأزرق والإكلوجيت) .
 - (3) نطاق التحول الإقليمى (صخور الشست الأخضر والأمفيوليت) .
 - (4) نطاق بداية الانصهار الجزئى الرطب .
 - (5) تصعد الصهارة الجرانيتية وتسبب التحول التماسى contact metamorphism .
- (After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

ب - التحول التماسى (الحرارى)

المتداخلات النارية . ويرجع التحول المعدنى فى العديد من الصخور المتحولة بالتماس ، وخاصة عند المتداخلات القريبة من السطح إلى درجة حرارة الصهارة المرتفعة ، ويكون تأثير الضغط مهماً عندما تتداخل الصهارة على أعماق كبيرة . ويكون التحول التماسى الناشئ عن الصخور البركانية محدوداً ، حيث تتكون فى هذه الحالات نطاقات رقيقة جداً بسبب تبرد اللابة بسرعة عند السطح ، ولا يوجد ما يكفى من الوقت لتؤثر حرارة اللابة على الأجزاء العميقة من الصخور المحيطة .

تسبب المتداخلات النارية فى تعرض الصخور المحيطة بها مباشرة إلى ظروف جديدة من الحرارة والضغط مما يؤدي إلى تحول الصخر إلى الأصل . ويعرف هذا النوع من التحول المحلى بالتحول التماسى contact metamorphism ، كما يسمى أحياناً بالتحول الحرارى thermal metamorphism . ويؤثر هذا النوع من التحول عادة على منطقة رقيقة فقط من الصخور المحيطة ، على امتداد أسطح التماس مع

ويسمى نطاق الصخر في المنطقة المحيطة بالتدخل الناري، والذي تظهر به آثار التحول باسم هالة التحول، والتي يبلغ سمكها عدة أمتار قليلة، المتداخلات الصغيرة، مثل: الجدد الموازية sills أو القواطع dykes والتي يبلغ سمكها عدة أمتار قليلة،



شكل (4.8): قطاع عرضي في قاطع من البازلت يبلغ عرضه مترا واحدا، يوضح التحول النحاسي contact metamorphism (الحراري) في الصخور المحيطة.

(After Mason, R., 1978: Petrology of the metamorphic rocks. George Allen and Unwin Murby, Thomas, London).

التحول metamorphic aureole. ويعتمد سمك هالة التحول على حجم الجسم المتداخل ودرجة حرارته، وعلى كمية الماء في الصخور المتحولة. ففي المتحول صلبا ودقيق التحبب ومكونا من كتلة من

وتعتمد مجموعة المعادن الموجودة في كل نطاق على التركيب المعدني للصخر الذي يتداخل فيه الجسم الناري وعلى السائل المتبق من الجسم الناري ، علاوة على درجة الحرارة والضغط .

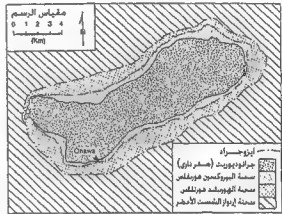
ويتواجد التحول التماسي على امتداد الألواح المتقاربة والنقاط الساخنة المحيطية والقارية، حيث يتواجد النشاط الناري الذي يرتبط به التحول . وحيث إن النشاط الناري يتواجد أيضا في التحول الإقليمي ، لذلك يوجد التحول التماسي أيضا في أحزمة الجبال المشوهة .

ج - التحول التهشمي

قد يحدث التحول على امتداد الصدوع ، حيث تسبب الحركات التكتونية تكسر القشرة الأرضية وانزلاقها ، مما يؤدي إلى تكسر الصخر الصلب وطحنه على امتداد سطح الصدع ، ويتكون نسيج مكسر ومطحون (شكل 6.8) . وقد يتحول الصخر المطحون إلى كتلة كالعجين ، وهذا هو التحول التهشمي **cataclastic metamorphism** . ويسمى التحول التهشمي أحيانا باسم التحول الديناميكي (التحول الحركي) **dynamic metamorphism** .

فعندما يتعرض صخر خشن التحبب مثل الجرانيت إلى إجهادات متباينة شديدة ، فإن حبيبات المعادن تتكسر وتطحن . ومع زيادة التحول التهشمي ، فإن حبيبات المعادن تصبح مستطيلة ويبدى الصخر نسيجاً متورقا ويعرف باسم الميوليت . ويحدث هذا التحول أساساً تحت ضغط مرتفع نتيجة طحن وجز **shearing** الصخر أثناء الحركات التكتونية . لذلك تتواجد الصخور التهشمية غالباً مع الصخور المتحولة إقليمياً في أحزمة الجبال المشوهة بشدة ، حيث يكون التصدع متدا وشاملاً .

الحبيبات المتداخلة المتساوية الحجم . ويحتوى المتداخل الناري الكبير الحجم على طاقة حرارية أكبر من تلك الموجودة في المتداخلات الصغيرة ، كما يخرج منه الكثير من بخار الماء . وعندما يبلغ قطر المتداخل الناري كيلومتراً أو أكثر ، فقد يصل عرض حالة التحول لآلاف مئات من الأمتار أو أكثر ، وتميل الصخور المتحولة لأن تكون خشنة التحبب (شكل 5.8) .



شكل (5.8): خريطة توضح حالة التحول **contact aureole** ، والتي تتكون في المنطقة المحيطة بالمتداخل الناري . وتوضح الخريطة نطاقات التحول متحدة المركز تقريباً يفصل بينها إيزوجراد (خط على الخريطة يصل بين النقاط التي حدثت عندها عمليات التحول تحت ظروف التحول والضغط نفسها) .

(After Philbrick, 1936, Moore, J. M., 1960, in Raymond, L.A., 1995: *Petrology: The study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic rocks*. Wm. C. Brown Publishers).

وفي داخل نطاقات التحول الكبيرة والتي تملئتها السوائل الحارة ، فإنه يمكن تعرف نطاقات عديدة متحدة المركز تقريباً مكونة من تجمعات معدنية ، يتميز كل نطاق منها بمدى معين من درجة الحرارة (شكل 5.8) . حيث تكون درجات الحرارة عالية بجوار الجسم الناري مباشرة ، وتتكون معادن لآلاف مائة مثل : الجرانيت والبيروكسين ، بينما توجد المعادن المائية مثل : الإبيدوت والأفيبول ، ثم معادن : الميكا والكلوريت في النطاقات الخارجية البعيدة عن الجسم الناري .

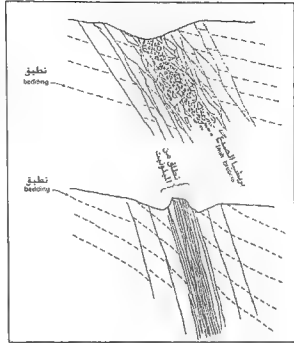
عنصر الصوديوم وخروج عنصر الكالسيوم أساساً ، يعرف بالسيليت *spilite* . ويحدث التحول الحرمائي أيضاً في القارات ، حيث تحول السوائل الحرمائية *hydrothermal solutions* المساعدة من المتداخلات النارية كلاً من الصخور التي تعلوها وكذلك الصخور المدفونة في الأعماق ، والتي يتم تحولها إقليمياً . وقد يحدث التحول الحرمائي في مناطق القشرة الأرضية المختلفة ، والتي تتواجد بها محاليل حرمائية .

هـ - التحول بالدفن

من المعروف أن الصخور الرسوبية تدفن تدريجياً نتيجة هبوط القشرة الأرضية (الأحواض الرسوبية) والتراكم السميك للرواسب ، فترتفع درجة حرارتها ببطء وتصبح في حالة اتزان مع درجات حرارة القشرة المحيطة بها . ويحدث بسبب هذه العملية تغيرات ما بعد الترسيب ، والتي تشمل تغير التركيب المعدني والنسيج . وتدرج عمليات ما بعد الترسيب إلى تحول بالدفن *burial metamorphism* ، وهو تحول منخفض الرتبة يحدث بسبب الحرارة والضغط الناشئ من حمل الرواسب والصخور الرسوبية المتراكمة .

IV. أنسجة التحول

تتكون في الصخور المتحولة أنسجة جديدة نتيجة لتحولها . ويحدد نوع هذا النسيج بناءً على حجم وشكل مكوناته من نوع البلورات ، بالإضافة إلى طريقة ترتيبها . وتعتمد بعض أنسجة التحول على وجود أنواع معينة من المعادن مثل الميكا ، والتي تتميز بوجود هيئة صفائحية . وقد تترث أنسجة التحول بعض أنسجة الصخر الأصلي ؛ لذلك فقد ينعكس حجم حبيبات صخر رسوبي على حجم البلورات التي تتكون أثناء التحول . ويدل كل نوع من أنسجة التحول على نوع عملية التحول التي أدت إلى نشأته .



شكل (6.8): قطاعان عرضيان في نطاقات صدع أثرت في صخور كتلية صلبة مثل الجرانيت.

(أ) نطاق صدع به بريشيا صدع ، تكوّن عند مستوى ضحل في القشرة الأرضية .

(ب) نطاق صدع به ميلونيت *mylonite* ، تكوّن عند مستوى أعمق في القشرة الأرضية .

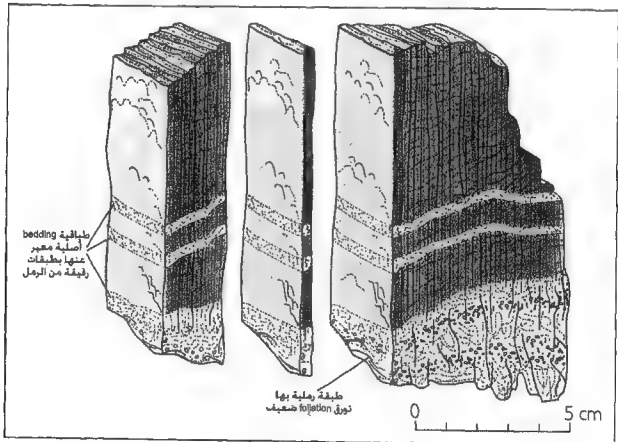
(After Mason, R., 1978: Petrology of the metamorphic rocks. George Allen and Unwin Murby, Thomas, London).

د - التحول الحرمائي

هناك نوع آخر من التحول يسمى التحول الحرمائي *hydrothermal metamorphism* يكون مصاحباً لحيود وسط المحيط ، ويعرف التحول في هذه الحالة بتحول قاع المحيط . حيث تتباعد الألواح وتنتشر وتكوّن الصهارات البازلتية الصاعدة قشرة محيطية جديدة . ويعمل البازلت الساخن على تسخين ماء البحر المتخلل في كسوره . وتخفف الزيادة في درجة الحرارة التفاعلات الكيميائية بين ماء البحر وصخر البازلت ؛ ليتكون نوع من البازلت يختلف في تركيبه الكيميائي عن تركيب البازلت الأصلي ، نتيجة إضافة

توجيهها مفضلا **preferred orientation** للمعادن، حيث تأخذ مستويات المعادن الصفائحية أثناء تبلورها اتجاهها مفضلا معينا، يكون عموديا على الاتجاه الرئيسى للقوى التى تضغط على الصخور وتؤدي إلى تشوها وتحويلها، كما يتضح من (شكل 8.8 أ). وقد تكتسب المعادن الصفائحية الموجودة فى الصخر الأصيل توجيهها مفضلا، وبذلك يتكون تورق نتيجة دوران البلورات حتى تصبح موازية للمستوى المتكون. وقد يؤدي التشوه اللدن أو ثنى الصخر الساخن اللين إلى تكوين بلورات لها توجيه مفضل.

التورق والانقسام: التورق **foliation** هو أكثر أنسجة الصخور المتحولة تحولا إقليميا شيوعا. ويشترك هذا المصطلح من الكلمة اللاتينية **folium** بمعنى ورقة؛ حيث يتكون من عدد من المستويات المتوازية المستوية أو المتوجة تكونت نتيجة التشوه. وعموما تقطع مستويات التورق الصخور، حيث تميل على مستويات تطبق الصخر الرسوبى الأصيل بزاوية ميل، كما قد توازى مستويات التطبق أيضا (شكل 7.8). ويرجع السبب الرئيسى للتورق إلى وجود معادن صفائحية (ميكا وكلوريت أساسا) تتبلور على هيئة بلورات صفائحية رقيقة، ثم تترافق هذه البلورات موازية لمستويات التورق. وتأخذ المستويات المتوازية



شكل (7.8): كسرات من الإردواز (يسار) توضح خاصية التورق **foliation** (خطوط رأسية) وبقيها تطبق سابق. ويلاحظ أن التورق الذى قد يتفصل الإردواز على امتداده، وهو نتيجة لعملية التحول، يتقاطع مع التطبق، والذي قد يتفصل الإردواز على امتداده أيضا، وهو نتيجة لعمليات رسوبية.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

المسكوفيت) على أبعاد منتظمة ومتوسطة الرقة في الصخر. ولقد استخدمت هذه الصفة منذ القدم لعمل إردواز سميك أو رقيق لتغطية أسطح المباني في أوروبا وأمريكا وكذلك لعمل السبورات .

١. الأنسجة المتورقة

تصنف الصخور المتورقة تبعاً لأربع ظواهر رئيسية . (شكل 7.8) هي:

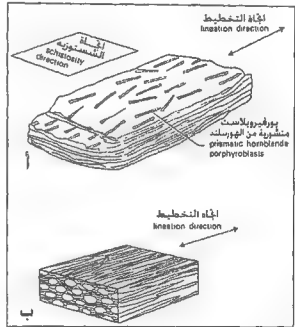
1. طبيعة التورق .
2. حجم البلورات .
3. الدرجة التي تتجمع فيها المعادن إلى شرائط فاتحة وغامقة .
4. درجة التحول .

وستتناول فيما يلي الأنواع الرئيسية للصخور المتورقة .

١. الإردواز

الإردواز **slate** هو أقل الصخور المتورقة رتبة في التحول . وتكون هذه الصخور التي تتميز بأسطح انفصال مستوية (انقسام إردوازي) دقيقة التحبب إلى الحد أنه لا يمكن رؤية المعادن فيها بسهولة دون استخدام المجهر (الميكروسكوب المستقطب) . وتكون هذه الصخور نتيجة تحول الطفل غالباً ، أو رواسب الرماد البركاني أحياناً . ويكون الإردواز رمادياً قائماً إلى أسود عادة ، يتلون بسبب وجود القليل من المادة العضوية ، والتي كانت توجد في الطفل أصلاً . وقد يكتسب الإردواز ألواناً حمراء أو قرمزية ، نتيجة وجود معادن أكاسيد الحديد . أما لون الإردواز المخضر فيرجع إلى وجود الكلوريت ، وهو معدن سيليكاتي صفائحى أخضر اللون يدخل الحديد في تركيبه ويرتبط مع الماء .

كما تميل المعادن التي تكون بلوراتها مستطيلة كالكلم ، مثل معادن الأمفيولات ، لأن تأخذ بلوراتها توجيهاً مفضلاً أثناء التحول ، حيث تترتب البلورات عادة موازية لمستويات التورق . وتبدى الصخور التي تحتوى على العديد من بلورات الأمفيول ، مثل البركانيات المافية المتحولة مثل هذا النوع من النسيج ، والذي يعرف بالتخطيط **lineation** ، حيث تترتب المعادن المستطيلة ، مثل الهورنبلند ، في وضع مواز لخطوط داخل الصخر (شكل 8.8 ب) .



شكل (8.8): خاصيتا التورق والتخطيط

(١) شست يتميز بوجود التورق (شستوزية schistosity)

والتخطيط lineation

(ب) صخر يتميز بوجود التخطيط lineation .

(After Mason, R., 1978: Petrology of the metamorphic rocks. George Allen and Unwin Murby, Thomas, London).

ويحتوى الإردواز على الكثير من أشكال التورق . والإردواز صخر متحول يفصل بسهولة على امتداد أسطح ناعمة مستوية إلى ألواح (شكل 7.8) . ويتكون هذا الانقسام الإردوازي **slaty cleavage** (يجب ألا يختلط هذا المصطلح مع انقسام المعدن مثل

2. الفيليت

تحتوى صخور الشست على طبقات رقيقة من الكوارتز والفلسبار أو كليهما، اعتماداً على محتوى الطفل أصلاً من معدن الكوارتز. وعموماً يتكون الشست في مراحل التحول الإقليمي المتقدمة للفيليت. ويستخدم مصطلح شست لوصف نسيج الصخر، بغض النظر عن تركيبه. ويمكن تمييز عدة أنواع من صخور الشست مثل: الشست الأخضر *greenschist*، والشست الأزرق *blueschist*، والشست الكلسي *calcschist*، والشست التلكي *talcschist*.

4. النيس

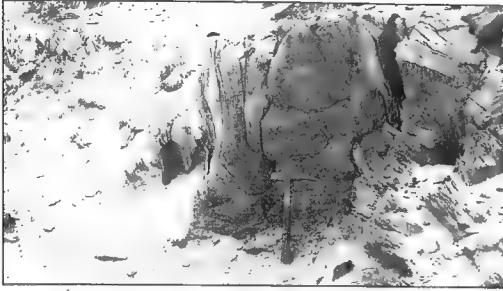
يتكون النيس *gneiss* عند تحول على الرتبة. ويكون النيس فاتح اللون، تتبادل فيه شرائط من معادن فاتحة اللون مع أخرى داكنة اللون (شكل 10.8). ويكون التورق في النيس أقل وضوحاً واستمرارية من التورق الموجود في النسيج الشستوزي، ولا يفصل النيس على امتداد أسطح التورق، حيث توجد به نسبة قليلة من المعادن الصفائحية. وصخور النيس صخور خشنة الحبيبة، وتكون نسبة المعادن المحيية إلى المعادن المفلطحة أو الصفائحية أكبر من تلك الموجودة في الإردواز أو الشست. ونتيجة لذلك.. فإن التورق يكون ضعيفاً ومتقطعاً، وبالتالي تكون قابليته للانفصال أقل. ويسمى التورق في صخور النيس باسم النيسوزية *gneissosity*. ويلاحظ أن سمك الشرائط الموجودة في النيس يكون أكبر من 2 إلى 3 مم. ويتحول التجمع المعدني المتكون عند درجات الحرارة العالية والضغط المنخفضة، أى تحول منخفض الرتبة والذي يحتوي على معادن الميكا والكلوريت، إلى تجمع معدني غني بالكوارتز والفلسبار مع كميات أقل من الميكا والأفيول.

يكون الفيليت *phyllite* أعلى قليلاً في درجة التحول من الإردواز، ولكنه يشبه الإردواز في أصله وصفاته. وتميل صخور الفيليت لأن يكون لها بريق لامع من بلورات الميكا، والتي تكون أكبر قليلاً عن تلك الموجودة في الإردواز. وتميل صخور الفيليت للانفصال إلى ألواح مثل الإردواز، ولكنها تكون أقل انتظاماً. ويظهر الصخر تورقاً واضحاً، ولذلك يسمى فيليت *phyllite* (من الكلمة اليونانية *phylloos* بمعنى ورقة).

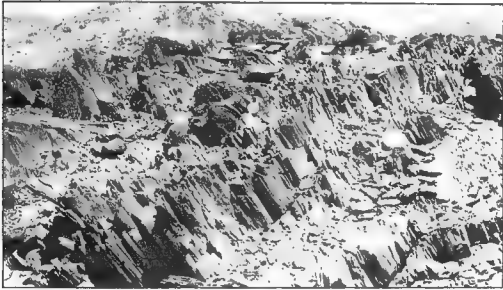
3. الشست

عند رتبة التحول المنخفض، تكون بلورات المعادن الصفائحية عموماً صغيرة جداً لكى ترى، ويكون التورق على مسافات متقاربة والطبقات رقيقة جداً. وإذا تم تحول الصخور المتحولة إلى رتبة أعلى، فإن التورق يصبح أكثر وضوحاً وانتشاراً خلال الصخر، وتنمو البلورات الصفائحية في الوقت نفسه إلى أحجام ترى بالعين المجردة، وقد تميل المعادن إلى التجمع في شرائط فاتحة وأخرى داكنة. ويؤدي هذا الترتيب للمعادن الصفائحية في الصخور خشنة الحبيبة إلى تكون التورق، والذي يعرف بالنيسوزية *schistosity*، والذي يميز صخور الشست (شكل 19.8).

وتعتبر صخور الشست *schists* من أكثر أنواع الصخور المتحولة انتشاراً (شكل 9.8)، وتحتوى على أكثر من 50٪ من مكوناتها معادن صفائحية، تتكون أساساً من كلوريت وميكا المسكوفيت والبيوتيت. وقد



أ



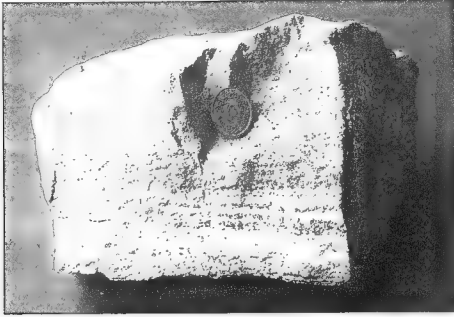
ب

شكل (9.8): خاصيتا الشستوزية schistosity والتخطيط lineation .

(أ) شست تعرض للطل، وسط الصحراء الشرقية - مصر.

(ب) شست يتميز بوجود تخطيط بمنطقة جيس مشيط - المملكة العربية السعودية . (أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن - هيئة المواد النووية)

وتتكون الشرائط الفاتحة والداكنة اللون في النيس نتيجة تجمع معادن الفلسبار والكوارتز فاتحة اللون ومعادن البيوتيت والأمفيبول الداكنة والمعادن المافية الأخرى . وقد تكون بعض أنواع النيس هي المقابل المتحول لصخور رسوبية مثل الحجر الرملي والطفيل، وتعرف بالبارانيس paragneiss، كما يكون بعضها الآخر المقابل المتحول للصخور النارية مثل الجرانيت، ويعرف النيس بالأورثونيس orthogneiss .



شكل (10.8): نيس gneiss يتميز بوجود تبادل شرائط ، من معادن فاتحة اللون مع أخرى داكنة، حيث يكون التورق ضعيفا . ويعرف هذا النسيج بالنيسوزي gneissosity ، منطقة مجف حفالت بالصحره الشرقيه - مصر .

المورنفلس ، بناء على التركيب المعدني للصخر، ونعرض هنا وصفا لكل من هذه الصخور :

1. المورنفلس

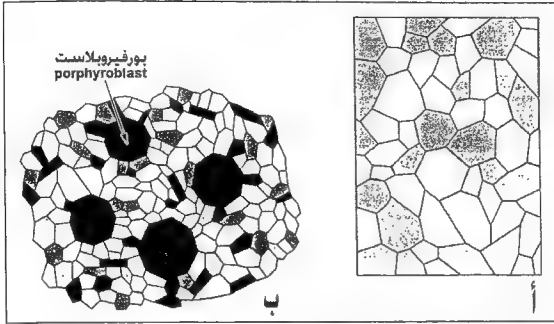
يعتبر المورنفلس hornfels صخرا مميزا للتحول التماسي لصخور الطفل والجرواكي تحت ظروف من الحرارة العالية . ويتكون من حبيبات متساوية الأبعاد ليس لها توجيه مفضل، ولم تتعرض لأى تشوه أو تعرضت لى تشوه قليل . أما البلورات الطويلة أو الصفاتحية فتكون مرتبة ترتيبا عشوائيا . وتتميز صخور المورنفلس بالنسيج الحبيبي عموما ، على الرغم من أنها تحتوى عادة على معادن البيروكسين المستطيلة وكذلك بعض معادن الميكا .

2. الكوارتزيت

الكوارتزيت quartzite صخر شديد الصلابة ، غير متورق وأبيض ، ينشأ من تحول أحجار رملية غنية

ب. الأنسجة غير المتورقة (الجرانوبلاستية)

ليست كل الصخور المتحولة متورقة ، حيث يبدى بعضها توجيها مفضلا للبلورات ضعيفا جدا ، مما يؤدي إلى اختفاء التورق تقريبا أو وجوده بنسبة قليلة . وتكون الصخور غير المتورقة nonfoliated أساسا من بلورات متساوية الأبعاد تقريبا تنمو بالمعدل نفسه فى جميع الاتجاهات مثل المكعبات أو الكرات مع قليل من البلورات الصفاتحية أو المستطيلة الشكل (شكل 11.8). ويعرف هذا النسيج غير المتورق بالنسيج الجرانوبلاستى granoblastic texture (blast لاحقة بمعنى تحول). وقد تنشأ مثل هذه الصخور نتيجة التحول التماسى أو الإقليمي أو الحرمانى أو التحول بالدفن . وتشمل الصخور غير المتورقة : المورنفلس والكوارتزيت والرغام والأرجيليت والحجر الأخضر والأفيوليت والجرانوبوليت . ويتم تصنيف تلك الصخور ، باستثناء



شكل (11.8): بعض أنسجة التحول

- (أ) نسيج جرانوبلاستي **granoblastic texture** غير متورق ، حيث تترتب الحبيبات المتداخلة عشوائيا في الصخر .
 (ب) نسيج بورفروبلاستي **porphyroblastic texture** ، حيث تحيط البلورات الصغيرة ببلورات أكبر حجما نعرف بالبورفروبلاستات **porphyroblasts** .

بعض أنواع الرخام الأخرى تطبق غير منتظم أو تكون مرقشة من شوائب سيليكاتية أو بعض المعادن الأخرى ، التي كانت موجودة في الحجر الجيري قبل التحول .

4. الأرجليت

الأرجليت **argillite** صخر غير متورق ، ينشأ نتيجة التحول الإقليمي منخفض الرتبة لحجر الطين أو أي صخر رسوبي آخر غني بمعادن الصلصال . ويتميز صخر الأرجليت بمكسر غير منتظم أو مكسر محاري . ويعزى عدم وجود التورق بهذا الصخر جزئيا إلى التحول منخفض الرتبة ، وأيضا لوجود حبيبات كوارتز في حجم الغرين أو أي معادن أخرى في صخر الطين الأصلي ، والتي تتميز بعدم الاستطالة أو الصفائحية .

بالكوارتز أو الصوان . وبعض أنواع الكوارتزيت تكون كتلية - أي لا تتخللها مستويات تطبق تم حفظها أثناء التحول أو مستويات تورق . وتحتوي بعض أنواع الكوارتزيت على طبقات رقيقة من الإردواز أو الشست ، وهي تمثل بقايا لطبقات من الصلصال أو الطفل . ويوجد الكوارتزيت في كل من مناطق التحول بالتماس والتحول الإقليمي .

3. الرخام

ينشأ الرخام **marble** نتيجة تحول صخور الحجر الجيري والدولوميت بالضغط والحرارة . وقد ينشأ الرخام نتيجة للتحول التماسي أو بالتحول الإقليمي . وتبدأ بعض أنواع الرخام الأبيض النقي مثل رخام كراة الإيطالية الشهير ، نسيج ناعم يتكون من حبيبات كالسيت متساوية الحجم ومتناسكة ، بينما قد تبدأ

5. الحجر الأخضر

عالية إلى عالية جدا . وتضم الصخور الحبيبية المتكونة عند درجة تحول أقل (التي لا تكون كلها جرانوليت) صخور الكوارتزيت والهورنفلس . وتشمل المعادن المميزة لصخور الجرانوليت كلاً من : الكوارتز والبلاجيوكليز والبيروكسين والجارنت والسليكايت . ومثل بقية الصخور المتحولة الحبيبية الأخرى ، فإن صخور الجرانوليت تكون متوسطة إلى خشنة التحبب ، حيث تكون البلورات متساوية الأبعاد ، وقد تبدو تورقا ضعيفا أو عدم تورق على الإطلاق . وتتكون هذه الصخور نتيجة تحول الطفل وصخور الحجر الرملي غير النقية وعديد من الصخور النارية الأخرى .

8. السربنتين

السربنتين **serpentinite** صخر متحول مكون من معادن السربنتين . ويتميز بأنه دقيق التحبب ، أخضر ، له بريق دهني ، وتصل صلابته إلى 4 . وهو صخر غير متورق لونه غامق جدا . يشيع فيه وجود أسطح لمساء ناعمة تشبه التورق ، مع لون أفتح أو لون أخضر مبرقش (منقش) . ويتكون السربنتين نتيجة تحول صخور نارية بلوتونية فوققافية .

9. حجر الصابون

حجر الصابون **soapstone** صخر ناعم جدا ، ذو ملمس صابوني ، دقيق الحبيبات ، يتكون من معدن التلك **talc** مع كميات مختلفة من معادن السربنتين والكلوريت والأمفيبول . وقد يختلف لون حجر الصابون حتى في العينة الواحدة . ويتكون حجر الصابون من التلك عندما يحتوى على نسبة عالية من الماغنسيوم ، نتيجة تحول صخر اليريدوتيت

يتكون الحجر الأخضر **greenstone** من صخور بركانية مافية متحولة منخفضة الرتبة . وهي تتكون عندما تتفاعل لابة مافية ورواسب الرماد البركانية مع مياه البحر المتخللة أو مع أى محاليل أخرى . ويقطى البازلت المتكون بهذه الطريقة مساحات كبيرة عند حيود وسط المحيط ، حيث يكون التحول تاما أو جزئيا . كما تتفاعل الصخور البركانية المدفونة فوق القارات ، وكذلك الصخور البلوتونية المكونة من صخور نارية مافية (جابلو) مع المياه الأرضية (الجوفية) عند درجات حرارة تتراوح بين 150° إلى 300° م ، وتتكون من صخور الحجر الأخضر . ويرجع اللون الأخضر لهذه الصخور إلى وجود معادن الكلوريت والإيدوت والأكتينوليت .

6. الأمفيبوليت

الأمفيبوليت **amphibolite** صخر غير متورق غالبا ، يتكون من معادن الأمفيبول وفلسبار البلاجيوكليز . ويتكون الأمفيبوليت نتيجة تحول متوسط أو على الرتبة لصخور بركانية مافية (أورثوأمفيبوليت **ortho-amphibolite**) . وقد تتكون بعض صخور الأمفيبوليت الأخرى نتيجة الإحلال المعدني للصخور الكربوناتية غير النقية والمارل (باراأمفيبوليت **para-amphibolite**) .

7. الجرانوليت

يتميز الصخر المتحول المعروف بالجرانوليت **granulite** بنسيجه الحبيبي ، إلا أنه يعرف بناءً على تركيبه المعدني ، حيث يتكون من معادن لامية **anhydrous minerals** والذي يدل على رتبة تحول

(صخر فوقاني) عند درجة حرارة أعلى قليلا من السربيتينيت .

ج - أنسجة البلورات الكبيرة (بورفيروبلاست)

قد تنمو المعادن المتحولة الجديدة نتيجة زيادة درجة الحرارة ، وتكون بلورات كبيرة تحيط بها أرضية دقيقة التجب من المعادن الأخرى . ويقابل هذا النسيج ظاهريا النسيج البورفيرى فى الصخور النارية . وتعرف هذه البلورات الكبيرة بالبورفيروبلاستات **porphyroblasts** ، وتوجد فى كل من الصخور المتحولة بالتماس والمتحولة إقليميا (شكل 11.8 ب) . وتنمو تلك البلورات نتيجة إعادة ترتيب المكونات الكيميائية للأرضية **matrix** ، وهى بذلك تحمل عمل أجزاء من الأرضية ، على عكس البلورات الظاهرة فى الصخور النارية ، والتى تكون أول المعادن التى تبلور أثناء تكوين الصخور النارية . وتنمو بلورات البورفيروبلاستات بسرعة أكبر من بلورات معادن الأرضية ، وذلك على حساب الأرضية . ويتراوح قطر البورفيروبلاستات بين عدة ملليمترات إلى عدة سنتيمترات ، كما يتغير تركيب البورفيروبلاستات أيضا . والجارنت والإستوروليت والأندالوسيت من المعادن الشائعة فى تكوين بلورات البورفيروبلاستات . ويمكن استخدام التركيب الدقيق وتوزيع بلورات البورفيروبلاستات هذه المعادن للتنبؤ بضغط ودرجات حرارة التحول . وجدير بالذكر أن بلورات الجارنت النقى الشفافة تكون ملونة بطريقة جميلة بالألوان مثل الأحمر (العقيق الأحمر) والأخضر والأسود ، حيث

د - أنسجة التشوه (الطحن)

يصاحب التشوه التركيبى معظم أنواع التحول ، بينما يؤدي التشوه الميكانيكى على امتداد أسطح الصدوع إلى التحول التهشمى . وتؤدي حركة سطحي كتلتى الصخور أمام بعضها البعض إلى طمس المعادن وترتيبها فى شرائط وخطوط **streaks** ، وتكون صخور متحولة تعرف بالميلونيت **mylonites** . وقد تكون هذه الصخور دقيقة التجب متورقة عندما تتكون فى الأعماق البعيدة من القشرة الأرضية ، حيث تشوه الصخور تحت الضغوط العالية جدا بطريقة التشوه اللدن . ويخلص جدول (1.8) أنواع الصخور المتحولة الرئيسية وخصائصها المميزة .

٧. التحول الإقليمي ورتبة التحول

تكون الصخور المتحولة ، كما أسلفنا ، فى مدى واسع من الظروف . ولذلك تعتبر معادن وأنسجة الصخور المتحولة أدلة للتنبؤ بدرجات الحرارة والضغط ، ووقت تكون هذه الصخور . وعند دراسة نشأة الصخور المتحولة فإن الجيولوجيين يبحثون عن شدة التحول ومميزاته بدقة ، وليس فقط عن تحديد هل كان التحول منخفض الرتبة أو عاليا . ولتحقيق ذلك ، فإنه يتم تعيين المعادن التى تعتبر أدلة على درجات الضغط والحرارة . ويكون هذا الأسلوب أوضح ما يكون عند التطبيق فى حالات التحول الإقليمي .

جدول (1.8): أنواع الصخور المتحولة الشائعة وخصائصها المميزة

النسيج	الصخر المتحول	المعادن المميزة	درجة التحول	مميزات الصخور	الصخر الأصلي (المصدر)
متورق Foliated	إردواز Slate	صلصال ، ميكسا ، كلوريت	منخفضة	دقيق التجيب ، يتفصل بسهولة على امتداد أسطح ناعمة مستوية كالألواح	صخور الطين ، صخور الصلصال ، الرماد البركاني
	فيليت Phyllite	حبيبات دقيقة من الكوارتز ، ميكسا ، كلوريت	منخفضة إلى متوسطة	دقيق التجيب ، يرقق لأمع	صخور طينية
	شست Schist	ميكسا ، كلوريت ، كوارتز ، تلك ، هورنبلند ، جارنت ، شتوروليت ، جرافيت	منخفضة إلى عالية	تورق محيز ، معادن يمكن رؤيتها	صخور طينية ، كربوناتها ، صخور نارية مائية
	نيس Gneiss	كوارتز ، فليسيارات ، هورنبلند ، ميكسا	عالية	تبادل شرائط من معادن فاتحة اللون مع أخرى داكنة اللون يمكن رؤيتها	صخور طينية ، صخور رمالية ، صخور نارية فلسية (جرانيتية)
	أمفيبوليت Amphibolite	هورنبلند ، بلاجيوكلاز	متوسطة إلى عالية	داكنة اللون ، تورق ضعيف	صخور نارية مائية
	ميجمايت Migmatite	كوارتز ، فليسيارات ، هورنبلند ، ميكسا	عالية	خليط من صخور متحولة مشوكة ونارية (غالبا جرانيتية)	صخور نارية فلسية مختلطة مع صخور رسوبية
غير متورق Nonfoliated	رخام Marble	كالكسيت ، دولوميت	منخفضة إلى عالية	حبيبات متداخلة من الكالكسيت أو الدولوميت ، تتفاعل مع HCl	حجر جيري أو حجر الدولوميت
	كوارتزيت Quartzite	كوارتز	متوسطة إلى عالية	حبيبات كوارتز متداخلة ، صلب	حجر رملي غني بالكوارتز
	الحجر الأخضر Greenstone	كلوريت ، إبيدوت ، هورنبلند	منخفضة إلى عالية	دقيقة التجيب ، لون أخضر	صخور نارية مائية
	هورنفلز Hornfels	ميكسا ، جارنت ، أنثالوسايت ، كورديريت ، كوارتز	منخفضة إلى متوسطة	حبيبات دقيقة متساوية الأبعاد ، صلب	صخور طينية

جديد ، عند الانتقال من الصخور المتحولة تحت رتبة

منخفضة إلى صخور أخرى متحولة تحت رتبة عالية .

فالمعادن الدالة هي معادن مميزة تحدد نطاقات التحول

التي تكونت في مدى محدد من درجات الحرارة

والضغط ، والمعادن الدالة التي تم تحديدها حسب

ترتيب ظهورها ، هي : الكلوريت والبليت والجارنت

والشتوروليت واليكانييت والسيليكايت . ويتكون هذا

التتابع من المعادن الدالة أساسا في صخور كانت غنية

أصلا في معادن الصلصال (شكل 12.8 أ) . وعندما

تحول الصخور الرملية أو الأحجار الجيرية وأحجار

الدولوميت التي تحتوي على معادن الكالكسيت

أ - أبزجراد (خط تساوي رتبة التحول) : عمل خرائط

لنطاقات التحول

لقد بدأت أول دراسة منظمة تفصيلية لمنطقة

صخور متحولة تحولاً إقليمياً في مرتفعات اسكتلندا .

وقد أوضحت تلك الدراسة أن الصخور التي لها

التركيب الكيميائي العام نفسه (تركيب صخر الطفل)

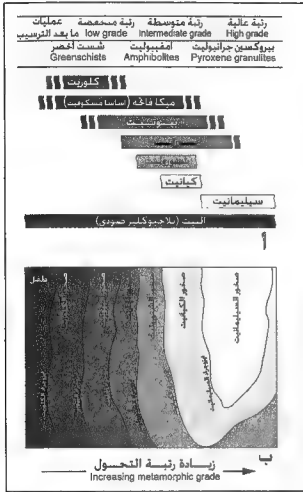
يمكن تقسيمها إلى تتابع من النطاقات ، حيث يتميز كل

نطاق بتجمع معدني مميز ، كما يتميز كل تجمع معدني

بظهور معادن جديدة . ولقد تم اختيار معادن دالة

index minerals ميزت ظهور كل تجمع معدني

والدولوميت تتكون مجموعة من المعادن الدالة مختلفة وأنواع معينة من الصخور كلما تقدمت عملية التحول تماماً . وهكذا تتكون مجموعة مميزة من المعادن الدالة في (جدول 2.8).



شكل (12.8):

(أ) التغير في التركيب المعدني للصخور الطفلة

shales عند تعرضها للتحول والانتقال من

رتبة تحول منخفضة إلى رتبة تحول عالية .

(ب) خريطة توضح منطقة تعرضت إلى تحول

إقليمي، حيث تحولت صخور الطفلة تحت

نفس ظروف تحول الصخور في (أ) من

الضغط ودرجة الحرارة . وتحدد خطوط

الأيزوجراد ظهور أول المعادن الدالة index

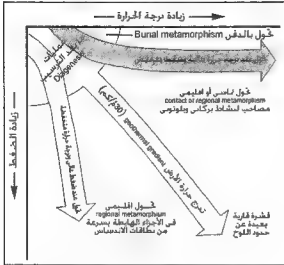
minerals .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

جدول (2.8) نطاقات التحول وتجمعاتها المعدنية الناشئة عن صخور سابقة مختلفة الأنواع

زيادة	رتبة التحول Metamorphic grade	نطاق التحول للصخور الغنية بالصلصال	صخور الطين Mudrocks	أحجار جيرية Limestones	صخور نارية مائية Mafic igneous rocks
التحول	منخفضة	نطاق الكلوريت	كلوريت، كوارتز، مسكوفيت، أليبت	كلوريت، كالسيت، أو دولوميت، أليبت	كلوريت، أليبت، أكتينوليت ² غلايبدوت
	متوسطة	نطاق البيوتيت	بيوتيت، كوارتز، أليبت	جارت، إيدوت، هورنبلند، كالسيت	جارت، كلوريت، إيدوت، أليبت
	مرتفعة	نطاق الشوروليت	شوروليت، ميكافايت، جارت، كوارتز، بلاجيوكليس	جارت، هورنبلند، بلاجيوكليس	جارت، هورنبلند، بلاجيوكليس
		نطاق الكيبايت	كيبايت، ميكافايت، بلاجيوكليس		
		نطاق السيليمانيت	سيليمانيت، جارت، ميكافايت، كوارتز، بلاجيوكليس	جارت، أوجيت، بلاجيوكليس	

* معدن دال index mineral، (1) أليبت: بلاجيوكليس غني بالصوديوم، (2) أكتينوليت: أمفيبول أخضر .



شكل (13.8): شكل يوضح أن مسارات الزيادة في الضغط ودرجة الحرارة الناشئة من زيادة العمق تعتمد على النشاط التكتوني والتأريخ. وتمتد المسارات المتعددة تتألف من الصخور المتحولة.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ب- رتبة التحول وتركيب الصخر الأصلي

يعتمد نوع الصخر المتحول الذي ينشأ عند رتبة تحول *grade of metamorphism* معينة جزئياً على التركيب المعدني للصخر الأصل. ويوضح شكل (12.8) تأثير ظروف التحول على صخور الطفل الغنية في معادن الصلصال والكوارتز، وربما بعض معادن الكربونات، بينما يوضح شكل (14.8) كيف يتبع تحول صخور بركانية مافية مكونة أساساً من الفلسبار والبيروكسين طريقاً مختلفاً. فمثلاً، يتكون معدن الكلوريت نتيجة تحول صخور غنية في معادن الصلصال مثل الطفل *shale* عند درجات حرارة منخفضة تصل إلى نحو 200°م، حيث يشير وجود معدن الكلوريت إلى رتبة تحول منخفضة. ويتكون عند أعلى رتبة تحول للصخور الغنية في معادن الصلصال معدن السيليكايت، حيث تزيد درجة الحرارة عن 500°م.

وعند توقيع الأماكن التي ظهرت فيها المعادن الدالة لأول مرة في صخور لها التركيب الكيميائي للطفل، أمكن تحديد سلسلة متتابعة من الأيزوجراد. والأيزوجراد *isograd* هو خط على خريطة يصل نقاط أول ظهور معدن معين في الصخور المتحولة، أي أنه يصل بين النقاط التي حدثت عندها عمليات التحول تحت ظروف الحرارة والضغط نفسها. ومن الشائع الآن استخدام الأيزوجراد عند دراسة كل أنواع الصخور المتحولة. كما يمكن تطبيقه في الصخور المتحولة بالتماس وبالدفن أيضاً، بالإضافة إلى الصخور المتحولة إقليمياً. ويوضح شكل (12.8 ب) استخدام الأيزوجراد في تتابع من الصخور المتحولة إقليمياً والتي نشأت عن تحول الطفل. ويكون الأيزوجراد الموضوع على أساس معدن دال واحد، مثل أيزوجراد الجارنت (شكل 12.8 ب)، قياس مناسب لتقدير ظروف التحول من درجات الحرارة والضغط. وتعرف المناطق بين خطوط الأيزوجراد على الخريطة بنطاقات التحول *metamorphic zones*. فنحن نتحدث عن نطاق كلوريت ونطاق بيوتيت وهكذا، وهي النطاقات التي ترسم على الخرائط لتوضح العلاقة بين الصخور المتحولة.

وحيث إن الأيزوجراد يعكس درجات الحرارة والضغط التي تكونت عندها المعادن، لذلك فإن تتابع خطوط الأيزوجراد في حزام متحول ما قد تختلف عن تلك الموجودة في حزام متحول آخر. وهذا صحيح لأن الضغط ودرجات الحرارة لا تزداد بالسرعة نفسها في كل المناطق والأوضاع الجيولوجية. فقد يزداد الضغط بسرعة عن الحرارة في بعض المناطق، بينما قد يكون أبطأ في مناطق أخرى (شكل 13.8).



شكل (14.8): التغيرات في التركيب المعدني للصخور البازلتية وصخور مافية أخرى تعرضت للتحول والانتقال من رتبة تحول منخفضة إلى رتبة تحول عالية. قارن بالتجمعات المعدنية للصخور الطفلة عند تعرضها للتحول تحت الظروف نفسها الموجودة في شكل (12.8) للاحظ تأثير التركيب الأصلي على التركيب المعدني للصخور المتحولة.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition, W. H. Freeman and Company, New York).

وتتميز الصخور الناتجة عن التحول الإقليمي لصخور البازلت عند أقل رتبة تحول باحتوائها على معادن الزئوليت، وهى مجموعة من المعادن الألومينوسيليكاتية المائية التى تشبه الفلسبارات في تركيبها، حيث يشكل الكالسسيوم والصدوديوم والبوتاسيوم الفلزات الأساسية بها. وتتميز هذه المجموعة بأنها تفقد وتكتسب ماء التبلور بسهولة. وتتكون هذه المعادن نتيجة التحول عند درجات حرارة وضغط منخفضة جدا.

وتتداخل رتبة الزئوليت مع رتبة أخرى أعلى في درجة تحول الصخور البركانية المافية (البازلت)، مما يؤدي إلى تكون صخور الشست الأخضر greenschists، والتى تضم مجموعة من المعادن الشائعة مثل: معادن الكلوريت والإبيدوت (يحتوى معدن ألومينوسيليكات على عنصرى الحديد والكالسيوم). ويلى الشست الأخضر تكون صخور

الأمفيبوليت amphibolites، والتى تحتوى على كميات كبيرة من معادن الهورنبلند (أحد معادن الأمفيول) وفلسبار البلاجيوكليز والجارت. أما أعلى رتب تحول الصخور البركانية المافية حيث تكون درجة الحرارة مرتفعة والضغط متوسط، فإنها تؤدي إلى تكون الجرانوليت granulite وهى صخور خشنة التحبب تحتوى على البيروكسين والبلاجيوكليز الكلسي.

وعلى الجانب الآخر، فإذا كان الضغط مرتفعاً ودرجة الحرارة متوسطة فإنه تتكون صخور تعرف بصخور الشست الأزرق blueschists. وتكتسب هذه الصخور اسمها من وجود معدن الجلوكونين glaucophane، وهو معدن أمفيول أزرق (يتميز بوجود نسبة من الصدوديوم)، بالإضافة إلى معادن الكيانيت ولاوسونيت lawsonite كما أسلفنا سابقاً. ومازال هناك صخر متحول آخر يتكون عند أقصى درجات الضغط، ودرجات حرارة تتراوح بين متوسطة إلى عالية، وهو صخر الإكلوجيت eclogite الغنى في معدني الجارت والبيروكسين.

ج. سجلات التحول

لقد أوضحت الدراسات الدقيقة للصخور المتحولة في جميع أنحاء العالم، أن التركيب الكيميائي لمعظم الصخور يتغير قليلاً أثناء التحول. وتشمل التغيرات الرئيسية التى تحدث في إضافة أو فقد بعض المواد المتطايرة، مثل: الماء H_2O وثاني أكسيد الكربون CO_2 . أما المكونات الرئيسية مثل: SiO_2 و Al_2O_3 و CaO و K_2O ، فإنها تبقى ثابتة. كما أوضحت تلك الدراسات أن التغيرات التى تحدث أثناء التحول هى تغيرات في تجمعات المعادن وليس في التركيب الكيميائي العام للصخور. ولقد أدت هذه الملحوظة إلى استنتاج أن تجمعات المعادن في الصخور المتحولة

بين المعادن في السحنة الواحدة ، ويتغير التجمع المعدني عند الانتقال من سحنة إلى أخرى نتيجة التفاعل بين المعادن (للتركيب الكيميائي نفسه) .

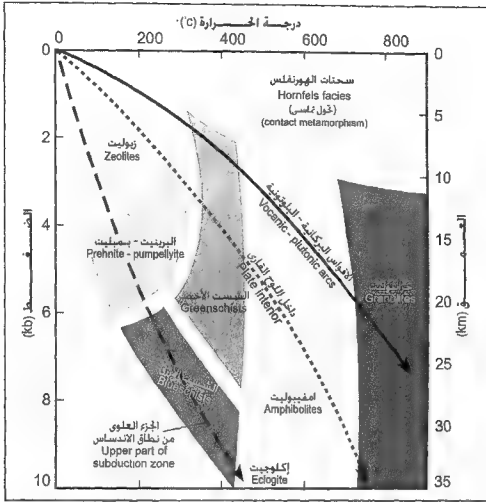
2- تتكون الأنواع المختلفة من الصخور المتحولة نتيجة تحول صخور أصلية ذات تركيب كيميائي يختلف عند رتبة التحول نفسها . ويبين جدول (3.8) قائمة بالمعادن الرئيسية لسحنات التحول المتكونة من صخور البازلت والطفل . ويوضح شكل (15.8) أن الحدود بين جميع سحنات التحول متدرجة وتقريبية ، بينما يوضح شكل (16.8) توزيع سحنات التحول عبر حد لوح مقارب .

والمستمدة من الصخور النارية والرسوبية الشائعة يجب أن تتحدد بدرجات الحرارة والضغط التي تعرضت لها هذه الصخور خلال عملية التحول . واعتقادا على هذه النتيجة ، فقد اقترح العالم الفنلندي الشهير إسكولا في عام 1915 م مفهوم السحنات المتحولة metamorphic facies . ويدل هذا المفهوم على أن كل مجموعة معادن تمثل تركيب صخر معين تصل إلى حالة اتزان أثناء التحول ، وفي مدى معين من الظروف الطبيعية لا بد أن تنتمي إلى سحنة التحول نفسها . وقد بنى إسكولا نتائجه على دراسة صخور البازلت المتحولة ، والتي كانت موجودة بين تسابع من الطبقات مختلفة التركيب تماما . والنقاط الأساسية في مفهوم سحنات التحول هي:

1- كل الصخور التي لها التركيب الكيميائي نفسه تعطي التجمع نفسه من المعادن نتيجة التفاعل

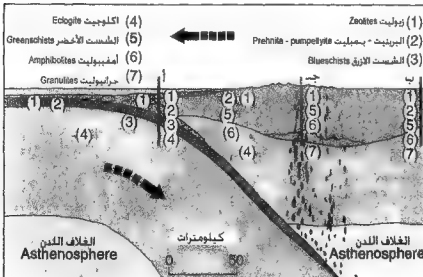
جدول (3.8): المعادن الرئيسية المميزة لسحنات التحول الناتجة من صخور أصلية مختلفة التركيب

الصخر الأصلي	Parent rock	السحنة
بازلت	طفل	Facies
هورنبلند، بيروكسين (غنى بالكالسيوم)، بلاجيوكلز (غنى بالكالسيوم)	بيونيت ، فلبسبار، تاسي ، كوارتز ، سيليكات ، جرانيت	جرانوليت Granulite
أمفيبول، بلاجيوكلز، جرانيت، كوارتز	جرانيت، بيونيت ، مسكوفيت ، كيانيت أو سيليكات، كوارتز	أمفيبوليت Amphibolite
كلوريت، أمفيبول، بلاجيوكلز صودي، إيدوت	كلوريت، مسكوفيت ، بلاجيوكلز (غنى بالصوديوم) ، كوارتز	الشست الأخضر Greenschist
جلوكوفين (أمفيبول صودي) أزرق ، كلوريت ، كيانيت ، لاوسونيت	أمفيبول أزرق ، كلوريت ، كوارتز ، مسكوفيت ، لاوسونيت	الشست الأزرق Blueschist
بيروكسين (غنى بالصوديوم)، جرانيت، كيانيت	جرانيت، بيروكسين (غنى بالصوديوم)، كوارتز	إكلوجيت Eclogite
بيروكسين ، بلاجيوكلز	أندالوسيت ، بيونيت ، فلبسبار ، تاسي ، كوارتز	هورنفلز Hornfels
كالسيت ، كلوريت ، زيوليت	زيوليت ، بيروفليت ، ميكاصودية	زيوليت Zeolite
كلوريت ، برونيت ، بلاجيوكلز صودي ، بميليت، إيدوت	كوارتز ، صلصال ، بلاجيوكلز صودي ، كلوريت	برنيت - بميليت Prehnite-Pumpellyite



شكل (15.8): السحنت المتحولة . تسمى السحنت بأسماء معادن أو أنواع صخرية شائعة في تلك السحنت . وتكون الحدود بين جميع سحنت التحول متدرجة وتقريبية . كما تمثل الأسهم الزيادة في درجة الحرارة مع زيادة العمق في ثلاثة مواضع تكتونية تمثلها الخطوط أ و ب و ج في شكل (16.8) .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).



شكل (16.8): شكل يوضح توزيع سحنت التحول عبر حدود متقارب. وتمثل الخطوط الرأسية الثلاثة التدرج الحراري في ثلاثة مواضع تكتونية وهي :
(أ) الجزء العلوي من نطاق الاندساس.
(ب) داخل حدود السوح القاري.
(ج) الأواس البركانية - البلوتونية .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

ferns وأشجار النخيل والعنب مناخا يتميز بدرجات حرارة دافئة وأمطار غزيرة ، بينما يتطلب التجمع النباتي المكوّن من أشجار النخيل والصبار وكف مريم (نبات عطري الرائحة) sagebrush مناخا حارا جافا .

ويلاحظ أنه عند نهاية الحد الأعلى للمسحبات عالية الرتبة ، فإن الصخور المتحولة تنصهر جزئياً في مرحلة انتقالية إلى صخور نارية . وهذه الصخور تكون مشوهة (معقوصة) ومطوية بقوة ويتخلله عديد من العروق ، ويكون الصخر المنصهر على هيئة أجسام قرنية صغيرة وعدسية الشكل . ويسمى هذا النوع من النيس الذي تتخلله العروق ، والمتحول عند رتبة تحول عالية جدا

وحيث إن مفهوم المسحبات المتحولة الذي اقترحه إسكولا كان يقوم على دراسة صخور البازلت المتحولة ، فإن معظم الأسماء التي أعطيت للمسحبات المتحولة تعكس تجمعات معدنية تكونت من صخور ذات تركيب بازلتى ، مثل سحنة الشست الأخضر ، إلا أن هناك بعض المسحبات التي تعرف بأسماء صخور أخرى مثل الجرانوليت ، أو بعض المعادن الشائعة في تلك المسحبات ، مثل : سحنة الزيوليت والبرينيت والببليت (شكل 15.8) .

ويأثّل مفهوم المسحبات المتحولة تحديد النطاقات المناخية بواسطة بعض التجمعات النباتية في كل نطاق مناخى ؛ فيقابل النطاق الذى تنتعش فيه السراخس



شكل (17.8): مجماتيت migmatite ، يتكون من خليط من طبقات داكنة اللون (صخور متحولة تتكون أساسا من بيوتيت وهورنبلند) من أجسام تكون عدسية مشوهة ومتداخلة مع طبقات فاتحة اللون من صخر نارى (فلسبارات وكوارتز) . وقد تحول الصخر الأصلى وتشوه بشدة بينما تكونت الطبقات فاتحة اللون في مرحلة لاحقة شرق وادى سيكيت . الصحراء الشرقية - مصر . (أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن ، هيئة المواد النووية) .

(شكل 5.8). ويعتمد سمك وخصائص هالة التحول على درجة حرارة الصهارة وعمق الصهارة المتداخلة في القشرة الأرضية. وتكون هالة التماس أوضح كثيراً عندما يتداخل جسم مائي، مثل تداخل الجابرو، وتصل درجة حرارته إلى نحو 1000°C في صخور القشرة على بعد كيلومترات قليلة بالقرب من السطح، حيث تتراوح درجة الحرارة بين نحو 60°C إلى 90°C . وفي هذا النوع من التحول، فإن درجة الحرارة تكون عالية جداً عند حد التماس، ولكنها تنخفض بسرعة إذا ابتعدنا عن هذا الحد. أما المتداخلات عند درجات حرارة أقل، مثل تداخل الجرانيت عند نحو 600°C ، فإنها تتداخل في الأجزاء الأعمق من القشرة الأرضية حيث تكون درجة الحرارة مرتفعة. ولذلك لا تسبب هذه المتداخلات ارتفاعاً كبيراً في درجة حرارة الصخور المحيطة، وبالتالي تكون التغيرات التحولية أقل.

ب. رتبة التحول وتركيب الصخر الأصلي

تختلف نطاقات التحول بالتماس باختلاف أنواع الصخور الأصلية التي تكون مماسية للمتداخلات الساخنة. وعلى الرغم من أن الرسم التخطيطي لسحنات التحول مثل تلك الموضحة في شكل (15.8) لا تضم الصخور المتحولة بالتماس، إلا أن هذه الصخور تظهر العلاقة نفسها بين رتبة التحول وتركيب الصخر الأصلي؛ حيث تختلف أنماط رتب تحول المعادن التي يبدىها الحجر الجيري غير النقي، والذي يتكون أساساً من معادن الكربونات، عن تلك الأنماط التي يبدىها الطفل، والذي يتكون في معظمه تقريباً من معادن سيليكاتية. فعند تعرض صخور حجر جيري غير نقي للتحول بالتماس، فإن معادن الكربونات تتفاعل مع شوائب السيليكات في الصخر لتكوّن معدن ولاستونيت

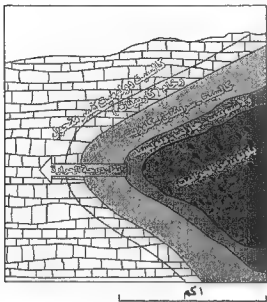
بالميجمايت *migmatite* (شكل 17.8)، وهو مصطلح يطلق على خليط من الصخور النارية والمتحولة. وتتكون بعض الميجمايت من الصخور المتحولة مع وجود نسبة صغيرة من الصخور النارية، بينما تتعرض بعض أنواع الميجمايت الأخرى للانصهار لدرجة أنه يمكن اعتبارها صخوراً نارية تقريباً.

VI. نطاقات التحول بالتماس

يمكن مشاهدة تأثير التحول لجسم ناري متداخل عند مكشف صخر الطفل المقطوع بقاطع *dike* أو تتواجد بين طبقاته جده موازية *sill*. وعند حدود تلامس الطفل مع القاطع، فإن الطفل يمكن أن يفقد كل نسيجه الأصلي، حيث يخفى التطبيق وتنطمس الحفريات ويتغير التركيب المعدني للطفل تماماً. ويتكون الصخر الملاصق تماماً للقاطع من بلورات كبيرة من البيروكسين أو معادن ألومينوسيليكاتية مثل الأندالوسيت، والتي لا توجد في معادن الصلصال دقيقة التحب مثل الطفل والصخور الرسوبية عموماً. وبعيداً قليلاً عن سطح التلامس، أي من عدة سنتيمترات إلى متر واحد، فإن حدود التطبيق للطفل يمكن رؤيتها ولكنها تكون ضعيفة، كما يمكن ملاحظة أن معادن الصلصال قد تغيرت إلى ميكاتبلورة. وعلى مسافة أبعد من سطح التلامس، يكون الطفل غير متغير تماماً. وهكذا، فإن نطاقات الصخور المتحولة بالتماس تكون مميزة بمعادن دالة، تعكس رتب التحول المختلفة، مثلها في ذلك مثل الصخور المتحولة إقليمياً.

أ. هالات التحول (هالات التماس)

تسمى المنطقة من الصخور المتحولة المجاورة للمتداخل الناري بهالة التحول *metamorphic aureole* أو هالة التماس *contact aureole*



شكل (18.8): التحول التماسي contact metamorphism
 حجر جيري مكون من الكالسيت والدولوميت ، مع شوائب من الكوارتز ومعادن الصلصال . يسبب التحول تكون حالة تماس contact aureole مكونة من عدة نطاقات من المعادن . وتندرج تلك النطاقات ، كلما قربنا من حدود التماس مع الجرانيت ، من صخر كربونات غير متحول خال من السيليكات إلى رخام مكون من كربونات إلى شرائط بها معادن مختلفة من سيليكات الكالسيوم والمغنسيوم .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ويؤدى التحول بالتماس للصحور السيليكاتية مثل
الطفل إلى التحول التدريجي (التقدمي)
progressive metamorphism، أى تكوّن
نطاقات معادن متنامية، تظهر تغيرا متصلا ومستمر في
رتبة التحول، إلا أن مجموعة المعادن المتكونة تختلف
عن تلك التي تظهر في صحور الحجر الجيري المتحولة.
فيوجد عند حدود التماس صحور المهورنفلس التي
تحتوي على البيروكسين والميكا. وتوجد في النطاقات
الداخلية القريبة من حرارة الصحور المتداخلة، معادن
من سيليكات الألومنيوم النقية مثل معدن السيليانيت
(Al_2SiO_5) المميز. بينما في النطاقات الخارجية الأقل

wollastonite، وهو معدن فاتح يمتص على الكالسيوم ويشبه معدن البيروكسين .

→ (SiO₂) سيليكات + (CaCO₃) كالسيت
(CO₂) ثاني أكسيد الكربون + (CaSiO₃) ولاستونيت

ويهرب ثاني أكسيد الكربون الناتج عن هذا التفاعل في صورة غاز عبر الشقوق والمسام في الصخور. ويحدث هذا التفاعل عند درجات حرارة نحو 500°م وضغوط قريبة من سطح الأرض، أو عند درجات حرارة أعلى نتيجة زيادة الضغط. وهكذا، فإن وجود معدن الولاستونيت يعتبر دليلاً على رتبة

تتحول صخر المصدر ، والذي تكون الكربونات هي المكون الأساسي له . ويوجد معدن الولاستونيت الذى يتكون عند درجات الحرارة الأعلى مع معدن الجرانيت (شكل 18.8) ومعدن الديوبسيد (بيروكسين) يحتوى على الكالسيوم والمغنسيوم) بالقرب من حدود التماس. فإذا ابتعدنا عن حدود التماس مع الجرانيت ، فإننا نجد نطاقاً يحتوى على السربنتين (سيليكات ماغنسيوم يحتوى على الماء المرتبط كيميائياً) مع الكلوريت والكالسيت . فإذا ابتعدنا أكثر ، نجد نطاقات تحول عند درجات حرارة أقل ، تتكون من صخر الرخام الخالى من السيليكات ويحتوى على الكالسيت والدولوميت . وبعد هذا النطاق لا تظهر أية أثار للتحول في الحجر الجيرى . وقد يبلغ عرض الحالة الكاملة عدة مئات من الأمتار. وجددير بالملاحظة أنه يمكن حدوث تبادل كيميائى واضح في حالة التحول بين الجسم النارى المتداخل والصخور المحيطة بها . لذلك فإن هذه العملية يمكن اعتبارها نوعاً من عملية التحول **metasomatism** ، والتي كما ذكرنا سابقاً تؤدي إلى تغير كيميائى في تركيب الصخر الكلى.

منخفضة تتبع سحنة الشست الأخضر. ويلعب دوران السوائل الحرماية خلال البازلت دوراً مهماً في تحول صخور البازلت، حيث يتفاعل الماء مع المعادن اللامائية وتتكون معادن مافية مثل الكلوريت والسيريتين. كما يحل الصوديوم الموجود في الماء محل الكالسيوم في معدن البلاجيوكليز الموجود في صخور البازلت.

ويوضح شكلاً (3.8 و 16.8) أن التحول الإقليمي يكون عند حد الاندساس للوح الهابط أثناء تقارب الألواح. فعندما تهبط الصخور المتبلورة لأسفل باللوح المندس بسرعة (نحو 1 سم/ عام) فإن الضغط يزداد تحت تلك الظروف عن درجة الحرارة بسرعة، ويتعرض الصخر لضغط عال ودرجة حرارة منخفضة نسبياً، وهي الضغوط ودرجات الحرارة المميزة لسحنة الشست الأزرق blueschist. ومن المحتمل أن تحول الشست الأزرق يحدث حالياً على امتداد الحافة الهابطة للوح الهادئ، حيث يندس تحت شاطئ أسكا وجزر البوشان. ويتكون عند أعماق أكبر سحنة الإكلوجيت eclogite حيث تكون درجة الحرارة أكثر ارتفاعاً.

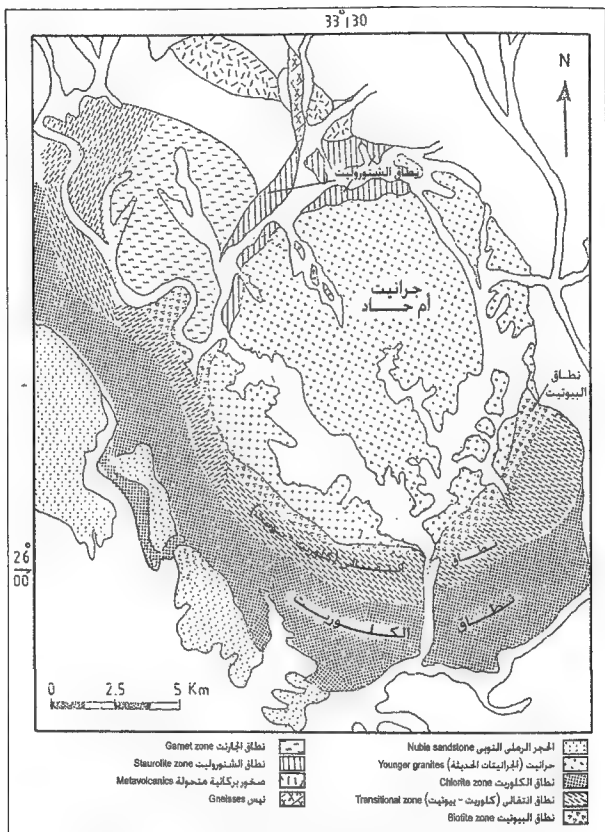
وتتواجد الظروف المميزة لسحنتي الشست الأخضر والأصفر والأصفر في حين يزداد سمك القشرة القارية نتيجة التصادم القاري، أو ارتفاع درجة الحرارة بواسطة الصحارة الصاعدة. ويعتبر التصادم القاري أكثر مناطق التحول الإقليمي شيوعاً، حيث يمكن رؤية مساحات عريضة من الصخور المتحولة إقليمياً في جبال الألبلاش والألب. كما يتميز عديد من المناطق في مصر والمملكة العربية السعودية بوجود عدة مناطق متحولة إقليمياً مثل منطقة حفافيت بالصحراء الشرقية المصرية ووادي فران ووادي الشيخ بسينا. ويحدث مثل هذا التحول حالياً تحت جبال الهيمالايا، حيث يزداد سمك القشرة القارية نتيجة التصادم،

في درجة الحرارة، تتحول معادن الكوارتز والصلصال والكربونات في الطفل إلى معادن ميكالبيوتيت والأندالوسيت والأمفيبول والكالسيت. وفي النطاقات الحارحية الأبعد، تتكون معادن الكلوريت والمسكوفيت. وهذا النوع من حالات التحول لا يحتوي على أي تبادل كيميائي في حالات التحول بين المتداخل الناري والصخور المحيطة. وبذلك لا يوجد تغير في التركيب الكيميائي الكلي للصخور، أي لا توجد عملية تحوّل للصخور. وتوضح الخريطة المبسطة لبلوتون أم حاد الجرانيتي بالصحراء الشرقية بمصر التوزيع التقريبي لنطاقات التحول حول البلوتون (شكل 19.8).

VII. التحول وتكتونية الألواح

إن أحد النجاحات التي أحرزتها نظرية تكتونية الألواح، أنها أمدتنا للمرة الأولى بتفسير لتوزيع نطاقات الصخور المتحولة في الصخور المتحولة إقليمياً. وقد أوضحنا عند بداية هذا الفصل العلاقة بين الأوضاع التكتونية المختلفة والعمليات الجيولوجية (مثل النشاط البركاني ونشأة الجبال) التي تسبب الأنواع المختلفة من التحول (شكل 3.8). كما يمكننا أيضاً أن نستنتج موقع الصخر في التحول، على أساس رتبة التحول والتركيب.

وترتبط صخور الحجر الأخضر greenstones، والتي تنتج عن تحول صخور نارية مافية مثل صخور البازلت والجابرو بالتحول الحرماي عند حيود وسط المحيط أثناء تباعد الألواح. فعندما يحدث انتشار لقيعان المحيطات وتصعد الصحارة البازلتية من الوشاح تحول حرارة الصحارة صخور البازلت المتبقية حديثاً في وجود الماء إلى صخور متحولة ذات رتبة تحول



شكل (19.8): خريطة مبسطة توضح التوزيع التقريبي لنطاقات التحول حول بلوتون منطقة أم حاد - الصحراء الشرقية - مصر .
(After El Kalloubi, B. A., 1988: Deformation events, mineral facies and metamorphic conditions in the contact aureoles of the Hammamat Group around Um Had pluton, Central Eastern Desert, Egypt. M.E. R. C. Ain Shams Univ., Earth Sc. Ser., 2. 172-190pp).

ويعتقد أن التحول بالدفن يوجد في الأجزاء السفلى من التراكبات السميكة للرواسب التي تتراكم على الرفوف والمنحدرات القارية . ومن المعروف أن مثل هذا التحول يحدث اليوم في التراكم الضخم للرواسب في خليج المكسيك .

الملخص

1. ينتج التحول ، وهو تغير التركيب المعدني والنسيج في الحالة الصلبة ، لصخور سابقة التكوين نتيجة زيادة في الضغط ودرجات الحرارة والتفاعل أحيانا مع مكونات كيميائية تتداخلت من المحاليل المتحركة . وتؤدي زيادة الضغط ودرجة الحرارة إلى تغيرات في النسيج ، كما أن المكونات الكيميائية للصخر الأصلي تعتمد ترتيب نفسها في مجموعة جديدة من المعادن تكون مستقرة تحت الظروف الجديدة .

2. تعرف الصخور المتحولة عند درجات حرارة وضغوط منخفضة نسبيا بأنها صخور منخفضة الرتبة ، بينما يشار إلى الصخور المتحولة عند درجات حرارة وضغوط مرتفعة بأنها صخور عالية الرتبة . وقد يضاف أو يزال بعض المكونات الكيميائية للصخر خلال عملية التحول ، ويحدث ذلك غالباً نتيجة تأثير السوائل المتقلة من المتداخلات القريبة .

3. هناك نوعان رئيسيان من التحول ، هما : أ - التحول الإقليمي ، والذي تتحول خلاله مساحات كبيرة من القشرة الأرضية نتيجة ضغوط ودرجات حرارة عالية تنشأ خلال عمليات بناء الجبال . وينتج التحول الإقليمي على امتداد نطاقات الاندساس وحواف الألواح المتصادمة . ب - التحول التماسي (التحول الحراري) ، والذي تتحول خلاله الصخور المحيطة بالصهارات أساساً بواسطة حرارة

وتحت جبال الأنديز حيث يزداد سمك القشرة الأرضية وترتفع درجة حرارتها من الصهارة الصاعدة . أما الأجزاء العميقة من القشرة القارية ، فإنها تسخن وتحول إلى رتب مختلفة نتيجة تصادم القارات وزيادة سمك الغلاف الصخري ، بينما يبدأ الانصهار الجزئي الرطب في النطاقات الأعمق حيث تتكون صخور الميجانيت ، وقد تستمر العملية لتصل إلى الانصهار الكامل وتكون الصهارة . وهذه الطريقة تنشأ خليط معقد من الصخور المتحولة والنارية في لب أحزمة التجبل orogenic belts ، التي تنشأ خلال عملية تكون الجبال . وعندما تقوم التعرية بإزالة الطبقات السطحية بعد ملايين السنين ، ينكشف لب أحزمة الجبال على السطح ، مما يؤدي إلى إمداد الجيولوجيين بسجل صخري لعمليات التحول التي كونت الشست والنيس وصخور متحولة أخرى .

وترتبط أيضاً عملية التحول metasomatism ونشأة المحاليل الحرمائية بتكونية الألواح ، نظراً لأن التحول يرتبط بالتحول الإقليمي والنشاط الصهاري . ويوضح شكل (11.19) مثالا لتوزيع رواسب النحاس الغنية بمعدن الكالكوبيريت في أمريكا الشمالية والجنوبية ، حيث يمكن تمييز حزام من الرواسب المعدنية المتكونة في / أو مرتبطة ببراكين طباقية قديمة تمتد على الحافة الغربية للأمريكتين . وقد نشأت الصهارات التي كونت البراكين الطباقية نتيجة للانصهار الجزئي الرطب لقشرة محيطية مندمسة ، بالإضافة إلى صخور الوشاح المتواجدة فوقها . كما كانت الصهارات مصدراً لحرارة المحاليل الحرمائية ، والتي أدت إلى تحول تلك الصخور المجاورة لها ، والتي انسابت خلالها المحاليل لتكوين رواسب الخامات . كما يوجد التحول الحرماي مصاحباً لمراكز الانتشار أيضاً عند حيود وسط المحيط أي عند حواف القارات المتباعدة .

يتكون من البازلت . وتتكون صخور الهورنفلس نتيجة التحول التماسى لصخور رسوبية دقيقة التحجب ، وأنواع أخرى من الصخور تحتوى على وفرة من المعادن السيليكاتية .

8. تتفاعل الصخور التى لها التركيب الكيميائى نفسه عند تعرضها لظروف التحول المتشابهة لتكوّن نفس التجمعات من المعادن . ويحدد كل تجمع معدنى سحنة تحولية معينة تمثل مدّى محددا من الضغط ودرجة الحرارة .

9. يشمل التحوّل مجموعة التغيرات التى تحدث فى التركيب الكيميائى للصخر عندما تضاف عناصر كيميائية ذائبة فى المحاليل ، أو عندما يفقد الصخر بعض العناصر أثناء تحلل المحاليل فى مسامه .

10. يمكن شرح الأنواع المختلفة للتحول من خلال نظرية تكتونية الألواح ؛ فالتحول بالدفن يوجد فى الأجزاء السفلية من تراكبات الرواسب عند الرفوف والمنحدرات القارية ، بينما نجد التحول الإقليمى عند نطاقات الاندساس والتصادم عند حواف القارات المقاربة . ويوجد التحول الحرمايى مصاحباً لمراكز الانتشار عند حيود وسط المحيط أى عند حواف القارات المتباعدة ، كما يوجد أيضاً فى القارات نتيجة للسوائل الحرمايية الصاعدة من المتداخلات النارية . أما التحول التماسى فينتج بسبب الحرارة المنبعثة من الصهارات المتداخلة فى أعماق ضحلة نسبياً أو قريبة من سطح الأرض .

الجسم النارى حيث تتكون هالات التحول . ويشمل التحول التماسى إعادة التبلور ، بينما يعتمد تقريباً الشوه الميكانيكى .

4. هناك ثلاثة أنواع إضافية من التحول وهى:

أ - تحول تهمشى ؛ حيث تطحن الصخور على امتداد مستويات الصدوع وقد تتغير معدنياً .

ب - تحول حرمايى ، ويحدث نتيجة تحلل المحاليل الساخنة لصخور القشرة المختلفة لتحوّلها .

ج - تحول بالدفن ، وهو نوع من التحول الإقليمى تتغير خلاله الصخور الرسوبية المدفونة فى الأعماق نتيجة الزيادة الطبيعية فى ضغط وحرارة القشرة .

5. تقسم الصخور المتحولة إلى قسمين رئيسيين تبعاً للنسيج ، هما:

أ. الصخور المتحولة المتورقة (وهى التى تبدى الانقسام الإردوازي والشستوية أو أى شكل من أشكال التوجيه المفضل) .

ب. جرانولاستية (غير متورقة) .

6. تشمل الصخور المتورقة صخور الإردواز والفيليت والشست والنيس .

7. تشمل الصخور الجرانولاستية (غير المتورقة) أنواعاً عدة ، منها : الرخام الذى يتكون من تحول الحجر الجيرى ، والكوارتزيت الذى يتكون من الحجر الرملى الغنى بالكوارتز ، والأرجيليت الذى يتكون من حجر الطين ، والحجر الأخضر الذى

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

<http://www.earth.ox.ac.uk/~davewa/metpet.html>
<http://www.geolab.unc.edu/Petunia/IqMetAtlas/meta-micro/metamicro.html>
<http://www.cobweb.net/~bug2/rock5.htm>
<http://www.gly.bris.ac.uk/www/jmq/JMG.html>

المصطلحات المهمة

amphibolite	أمفيبوليت	marble	رخام
argillite	أرجيليت	metamorphic aureole	هالة التحول
back-arc basin	حوض خلف قوس	metamorphic facies	سحنة تحول
blueschist	شست أزرق	metamorphic rocks	صخور متحولة
burial metamorphism	تحول بالدفن	metamorphic zones	نطاقات تحول
calc-schist	شست كلسي	metamorphism	تحول
cataclastic metamorphism	تحول تشمي	metasomatism	تحوال
confining pressure	ضغط حابس	migmatite	ميجماتيت
contact aureole	هالة التماس	mylonite	ميلونيت
contact metamorphism	تحول تماسي	nonfoliated	صخور غير متورقة
differential stress	إجهاد متباين	phyllite	فيلليت
directed pressure	ضغط موجه	porphyroblast	بورفيروبلاست
eclogite	إكلوجيت	porphyroclast	بورفيروكلاست
foliation	تورق	preferred orientation	توجيه مفضل
fore-arc basin	حوض أمام قوس	prograde metamorphism	تحول متصاعد
gneiss	نيس	progressive metamorphism	تحول تدريجي
gneissosity	نيسوزية	quartzite	كوارتزيت
granoblastic texture	نسيج جرانوبلاستي	regional metamorphism	تحول إقليمي
granulite	جرانوليت	retrograde metamorphism	تحول تراجع
greenschist	شست أخضر	schist	شست
greenstone	حجر أخضر	schistosity	شستوزية
high-grade metamorphism	تحول عالي الرتبة	serpentine	سربنتينيت
hornfels	هورنفلس	slate	إردواز
hydrothermal metamorphism	تحول حرماي	slaty cleavage	انشقاق إردوازي
hydrothermal solution	محلول حرماي	soapstone	حجر الصابون
index mineral	معدن دال	talc schist	شست تلكي
isograd	أيزوجراد (خط تساوي رتب التحول)	thermal metamorphism	تحول حراري (تحول تماسي)
lineation	تخطيط	uniform stress	إجهاد منظم
low-grade metamorphism	رتبة تحول منخفضة	zeolite	زبوليت

الأسئلة

- 1- اذكر أنواع التحول المرتبطة بالتدخلات النارية.
- 2- اذكر أنواع التوجيه المفضل للمعادن ، التي يمكن توقع وجودها في الأمفيبوليت.
- 3- اذكر اسم معدن شائع التواجد في صخر الشست ، والذي يسبب التوجيه المفضل .
- 4- اذكر اسم صخرين متحولين غير متورقين . ما البورفيروبلاست ؟
- 5- اشرح معنى الأيزوجراد .
- 6- ما الفرق بين صخر الكوارتزيت والحجر الرملي ؟
- 7- كيف ترتبط سحنات التحول بدرجات الحرارة والضغط ؟
- 8- في أي أوضاع تكتونية الألواح يتمثل وجود التحول الإقليمي ؟
- 9- عند رسم خريطة لصخور متحولة ، لوحظ وجود خطوط أيزوجراد ممتدة من الشمال إلى الجنوب ، وكانت المعادن الدالة هي الكيانيت في الشرق إلى الكلوريت في الغرب . اذكر هل درجات حرارة التحول أعلى في الشرق أم في الغرب ؟
- 10- ما الذي يحدد تكوين أي معدن من المعادن متعددة الشكل لسيليكات الألومنيوم Al_2SiO_5 في الصخور المتحولة ؟
- 11- قارن بين المعادن التي تتكون نتيجة التحول التماسي لحجر جيري نقى ، وحجر جيري يحتوي على طبقات من الطفل .
- 12- اذكر نوع التداخل الناري الذي يسبب أعلى رتبة تحول ، وهل هو متداخل جرانيتي عند عمق 20 كم أو متداخل من الجابرو عند عمق 5 كم ؟
- 13- لماذا لا يمكن توقع وجود صخور متحولة بالدفن عند حيد وسط المحيط ؟ اقترح بعض الأماكن التي يحتمل تواجد التحول بالدفن فيها اليوم.
- 14- أين يمكن توقع تواجد الصخور المتحولة التشمعية ، في وادي خسف قاري أم في قوس بركاني ؟
- 15- لماذا لا توجد صخور متحولة تحت الظروف العادية المنخفضة جدا من الضغط ودرجة الحرارة ؟
- 16- اذكر أسماء ثلاثة معادن تتواجد فقط في الصخور المتحولة .
- 17- كيف يختلف الشست عن النيس ؟
- 18- تحت أي ظروف من الضغط ودرجة الحرارة يمكن أن تتواجد سحنات الشست الأزرق ؟ اذكر البيئة الجيولوجية التي تتواجد فيها تلك العوامل من الضغط ودرجة الحرارة . اقترح بعض الأماكن التي يمكن أن يحدث فيها تحول الشست الأزرق على الكرة الأرضية حاليا .

الفصل

9

الزمن الجيولوجي

أ. العمر النسبي :

أ. السجل الطبقي (الاستراتيجافى) :

1. القواعد الأساسية لتحديد العمر النسبي

2. عدم التوافق

II. مضاهاة الوحدات الصخرية

III. العمر المطلق :

أ. أسس التقدير الإشعاعى

ب. الاضمحلال الإشعاعى

ج. سلاسل الاضمحلال الإشعاعى

د. تحديد العمر باستخدام الكربون المشع

هـ. تحديد العمر باستخدام مسارات الانشطار

و. تحديد العمر باستخدام الأحماض الأمينية

IV. العمود الجيولوجى ومقياس الزمن الجيولوجى :

أ. بناء مقياس الزمن الجيولوجى

ب. مشكلات تحديد الأعمار فى مقياس الزمن الجيولوجى

V. التصنيف الطبقي (الاستراتيجافى)

الجيولوجية البطيئة مثل التعرية ، تعنى أن الزمن الجيولوجي النسبي تقابله فترات زمنية مطلقة ضخمة . ولم يستطع ليل أن يتخطى هذا التفكير بالنسبة للزمن الجيولوجي ؛ حيث كانت تقصه وسيلة تقدير العمر المطلق مثل هاتون ؛ نظراً لأن النشاط الإشعاعي (إشعاع ذري) ، وهو الطريقة الدقيقة لتقدير الزمن المطلق ، لم يكن قد اكتشف بعد . والنشاط الإشعاعي هو ساعة طبيعية تدق باستمرار فترك سجلاً محفوظاً لهذه الدقات في الصخور . ولقد أظهر سجل الساعة الإشعاعية أن عمر الأرض يقدر بـ 4.6 بليون سنة . وهذا العمر الزمني الجيولوجي أكبر بكثير جداً مما تخيله ليل أو أى من رفاقه . لذلك فإن إدراك هذا الامتداد الزمني الطويل جداً يعتبر عملية صعبة جداً ؛ لأننا نقيس الزمن منسوباً لعمر الإنسان ، وهو ما يمثل مجرد لحظة في الزمن الجيولوجي . وهناك وسيلة لإدراك طول الزمن الجيولوجي استخدمها دون إيشر . Don Eicher عام 1968 م في كتابه "الزمن الجيولوجي" . حيث مثل كل الزمن الجيولوجي وهو 4.6 بليون سنة بسنة ميلادية واحدة طولها اثنا عشر شهراً . تمتد من يناير حتى ديسمبر ، ويكون ترتيب الأحداث الجيولوجية المهمة ، خلال هذه السنة ، على النحو التالي :

- الفترة من أول شهر يناير حتى منتصف شهر مارس ، فترة مفقودة من تاريخ الأرض .
- يرجع عمر أقدم الصخور على وجه الأرض إلى منتصف شهر مارس .
- خلق أقدم كائن على وجه الأرض في البحار في شهر مايو .

يختلف الجيولوجيون ، وكذلك علماء الفلك ، عن معظم بقية العلماء في تعاملهم مع الزمن ؛ فالفيزيائيون والكيميائيون يقومون بدراسة عمليات تدوم لفترة نقل عن كسور الثانية ، بينما يقوم آخرون بإجراء تجارب تستمر من بضع دقائق إلى عدة ساعات . وعلى العكس من ذلك فإن الجيولوجيين يتعاملون مع مدى واسع من الزمن . فالهزات الأرضية تستمر لثوان أو لدقائق ، بينما يمتد بناء الجبال لعدة ملايين من السنين . ويتعامل الجيولوجيون مع نوعين من الزمن: زمن نسبي وزمن مطلق . ويعرف الزمن النسبي *relative time* بأنه ترتيب الأحداث الماضية ترتيباً زمنياً حسب ترتيب وقوعها . أما الزمن المطلق *absolute time* فهو الزمن المقدر بالسنوات منذ وقوع حدث ما . ويشبه تحديد العمر النسبي معرفة أن الحرب العالمية الأولى سبقت الحرب العالمية الثانية . أما العمر المطلق فهو معرفة عدد السنين منذ أن بدأت وانتهت كل منهما .

وقد كان جيمس هاتون James Hutton أول من فهم المعنى الحقيقي للزمن النسبي في الجيولوجيا . ولم يكن لدى هاتون أية وسيلة لقياس الزمن المطلق في تاريخ الأرض ، ولكن استطاع هاتون أن يثبت أن تتابع الأحداث الجيولوجية القديمة في أسكتلندا قد حفظ في السجل الصخري ، حيث يمكن استخدام الصخور التي تكونت في الماضي وحفظت من التعرية كذاكرة للأرض لتسجيل الأحداث الجيولوجية الماضية . وقد استطاع تشارلز ليل Charles Lyell ، وهو أسكتلندي الأصل مثل هاتون ، استخدام اكتشاف هاتون لتحديد العمر النسبي لكل الأحداث الجيولوجية . وقد أدرك ليل أن بعض العمليات

متسلسلا من الأقدم إلى الأحدث ، كما يمكن تحديد أعمارها المطلقة مقدرة بالسنين .

ويشمل الزمن الجيولوجي الأحداث التي وقعت في فترة ما قبل التاريخ بداية من نشأة الأرض ، مروراً بكل الأحداث التي شكلت الأرض حتى اليوم ، مرتبة ترتيباً متسلسلاً حسب تاريخ وقوعها . وتقدر الأزمنة بملايين السنين من الآن ، ويعبر عنها اختصاراً بالرمز Ma . وقد سجل هذا الزمن الجيولوجي في صخور القشرة الأرضية ، حيث يشبه السجل الصخري صفحات وفصول الكتاب الذي يحوى أسرار تكوين الأرض في الماضي .

وفي الحقيقة فإن مقياس الزمن الجيولوجي يشمل مقياسين هما : المقياس النسبي والذي يعبر عن ترتيب الأحداث الجيولوجية كما حدثت من خلال وضعها في السجل الصخري . وتطلق على الفترات المختلفة من الزمن الجيولوجي مسميات مميزة مثل : الكمبري والبرمي والطباشيري . أما المقياس الثاني فهو المقياس المطلق والذي يقدر الأعمار بعدد السنين مقدرة بملايين السنين من الآن (Ma) . وتبنى هذه الأعمال على التحلل الإشعاعي الطبيعي لعناصر كيميائية مختلفة ، توجد بكميات قليلة في معادن معينة في بعض الصخور . ويمثل الإلمام بقواعد تقدير العمر النسبي والمطلق حجر الزاوية في فهم تاريخ الأرض .

والسؤال الذي يطرح نفسه : كيف أمكن لعلماء الأرض أن يقرأوا ويفكوا شفرة التاريخ المسجل على هذه الصخور ؟ ، وكيف رتبوا الأحداث الجيولوجية في إطار زمني متسلسل ؟ . وسنحاول في هذا الفصل أن نختبر الطرق الرئيسية التي اتبعها علماء الأرض لتحديد الزمن . كما سنعرف التطور التاريخي لمفاهيم الزمن الجيولوجي ومولد وتطور العمود الجيولوجي . ونبدأ بمناقشة وسائل تقدير العمر النسبي في الجيولوجيا :

- انتقلت النباتات والحيوانات إلى اليابس في نهاية شهر نوفمبر .
- تكونت رواسب الفحم السميكة في أوروبا وأمريكا في بداية شهر ديسمبر .
- وصلت الديناصورات إلى قمة انتشارها في منتصف شهر ديسمبر .
- اختفت الديناصورات من على وجه الأرض في 26 ديسمبر .
- ظهرت القردة العليا الشبيهة بالإنسان في ليلة 31 ديسمبر .
- بدأت أحدث المسالجات القارية continental glaciers في التراجع والتقلص من منطقة البحيرات العظمى في كندا وشمال أوروبا قبل حوالي دقيقة واحدة و 15 ثانية قبل منتصف ليلة 31 ديسمبر .
- حكمت روما العالم الغربي لمدة 5 ثوان من الساعة 11:59:45 إلى 11:59:50 قبل منتصف ليلة 31 ديسمبر .
- اكتشف كولومبس أمريكا قبل ثلاث ثوان من منتصف ليلة 31 ديسمبر .
- ظهر علم الجيولوجيا على يد جيمس هاتون قبل حوالي ثانية واحدة من نهاية العام .

1- العمر النسبي

تختلف الطرق التي يقيس بها الجيولوجيون الزمن عن كل طرق قياس الزمن التي عرفها الإنسان على امتداد تاريخه . فالأحداث التاريخية دونتها البشرية وتناقلتها من جيل إلى جيل . ونحن معتادون على أنواع معينة من مقياس الزمن التاريخي . ونحن نتذكر من حين لآخر تواريخ محددة ذات أهمية خاصة في حياتنا . ويمكن ترتيب هذه الأحداث على مقياس الزمن ترتيباً

أ- السجل الطبقي (الاستراتيجرافى)

1- القواعد الأساسية لتحديد العمر النسبى

هناك عدة قواعد أساسية تستخدم لتفسير الأحداث الجيولوجية فى السجل الصخرى، يمكن توضيحها فيما يلى:

أ- قاعدة تماقب الطبقات Principle of stratigraphic superposition

هى إحدى القواعد الأساسية لعلم الطبقات، وتنص على أن كل طبقة فى التسلسل الرسوبى الذى لم يتعرض لأية قوى تكتونية تكون أحدث عمرا مما تحتها وأقدم فى العمر من الطبقة التى تعلوها (شكل 1.9). ويعتبر تطبيق قاعدة التماقب الطبقي هو الخطوة الأولى فى تقدير العمر النسبى فى الصخور الطباقية.

وحيث إن قاعدة التماقب الطبقي تختم عدم تعرض التسلسل الطبقي لتأثيرات تكتونية، فإنه من المهم أن نعرض لقاعدة أخرى من قواعد علم الطبقات تعالج التاريخ النسبى فى التسلسلات المتأثرة بالعمليات التكتونية، وهو ما يعرف بقاعدة الأفقية الأصلية.

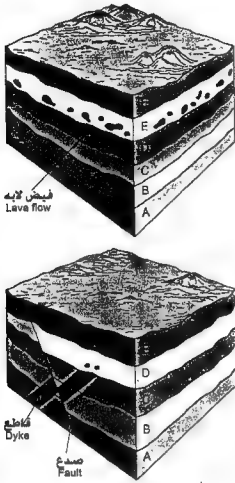
ب- قاعدة الأفقية الأصلية Principle of original horizontality

وهى تنص على أنه ليس فقط عملية الترسيب التى تحدث من أسفل لأعلى (وبالتالى تتجمع الرواسب فى طبقات متلاحقة)، ولكن أيضا أسطح الترسيب، والتى تكون مستوية أساسا ولا تحمى إلا بدرجات قليلة عن الأفقى. ولهذا فإن الطبقات الرسوبية تكون أساسا أفقية، لأن الأسطح التى تتجمع فوقها الرواسب (والتي تفصل بين الرواسب من جهة والماء أو الهواء من جهة أخرى) تكون أفقية أساسا، وتتجمع فوقها الحبيبات تحت تأثير الجاذبية. وعلى الرغم من أن التماقب المقاطع cross-bedding والذى سبق مناقشته أثناء

من بين أنواع الصخور الثلاثة (النارية والرسوبية والمتحولة)، والتى تكوّن القشرة الأرضية، فإن الصخور الرسوبية تمثلا بسجل أكثر اكتمالا لتاريخ الأرض. وعلى الرغم من أن الصخور النارية تمثل أكثر من 90٪ من حجم القشرة الأرضية، فإن الصخور الرسوبية تمثل أكثر من 75٪ من الصخور المكشوفة على سطح الأرض أو توجد فى الكيلومترات القليلة القريبة من السطح. وتمثل الطباقية stratification أو bedding التى توجد فى الصخور الرسوبية أهمية خاصة فى بناء تاريخ الأرض؛ حيث تسمح الطباقية بوضع ترتيب وتنظيم وتحديد للتتابعات الطباقية stratigraphic sequences.

ويعرف علم الطبقات (الاستراتيجرافيا) stratigraphy بأنه العلم الذى يدرس الصخور الطباقية أو الطبقات ومضاهاتها. وهو يدرس العلاقات المكانية والزمنية بين أجسام الصخور وديناميكية ترسيبها، والتى يمكن ملاحظتها وتفسيرها. وتتبع الطباقية من ترسيب وتجمع الحبيبات الصلبة، والتى تستقر على القاع من الماء أو الهواء تحت تأثير الجاذبية الأرضية فى هيئة طبقات beds متتالية متعاقبة.

وتحدث عملية الترسيب بشكل دورى تعكس فترات ترسيب بعقبها فترات سكون أو توقف للترسيب. وهذا النشاط الدورى فى الترسيب هو المسئول أساسا عن الأنسجة المختلفة التى تلاحظ فى الطبقات المتتالية، وأيضا فى أسطح الطباقية bedding planes التى تفصل بينها. وتحدث عملية الترسيب فى أحواض ترسيب مختلفة الأحجام. وتتصلد الرواسب وتتصخر نتيجة للدفن تحت طبقات لاحقة لها، مما يزيد من وضوح أسطح الطباقية والحدود بين الطبقات.



شكل (1.9): التقدير النسبي لأعمار الصخور

(أ) طبقات رسوبية تملؤها لابة يطبق عليها قاعدة التماكب الطبقي stratigraphic superposion ، حيث تكون الوحدة (A) أقدم الطبقات يليها الوحدة (B) فالوحدة (C) فالوحدة (D) فالوحدة (E) فالوحدة (F). لاحظ أن وجود بعض المكتشفات من الوحدة (D) في الوحدة (E) يدل على أن الوحدة (E) أحدث عمرا من الوحدة (D).

(ب) بتطبيق قاعدة القطع المستعرض cross cutting relationship يتضح أن القاطع أحدث عمرا من الوحدة (C) ، بينما يكون أقدم من الوحدة (D) . ونشير إزالة التجوية للجزء العلوى من القاطع إلى أن الوحدة (D) أحدث عمرا من القاطع ، كما أن الصدع يكون أحدث عمرا من الوحدة (D) وأقدم عمرا من الوحدة (E).

لاحظ أن هذا الشكل يحتوى على سطحي عدم توافق unconformity أحدهما بين الوحدتين (C) و (D) والآخر بين (D) و (E) .

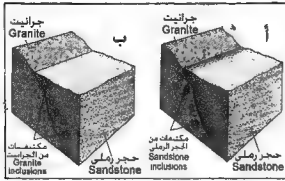
تراكيب رسوبية أولية تتكون عند ترسيب الرواسب . وتوجد التراكيب الرسوبية على السطح الخارجى للطبقات ، كما قد توجد داخل الطبقات أيضا (شكل 13.10).

ج- قاعدة الاستمرارية الجانبية الأصلية Principle of original lateral continuity

ترسب الصخور الرسوبية في أجسام ثلاثية الأبعاد، وتمتد أفقيا في كل الاتجاهات حتى تتلاشى عند حافة حوض الترسيب الذى ترسب فيه ، أو تتغير خواصها إلى نوع آخر من الرواسب . ويتحدد امتداد الطبقات أفقيا من خلال عملية المضاهاة correlation. فعندما نضاهى المكتشفات المنفصلة للوحدة الصخرية نفسها

دراسة الصخور الرسوبية ، يكون مائلا ، إلا أن التوجه الكلى لوحداث التطبيق المتقاطع تكون أفقية . وعندما نشاهد تتابعات طبقية تميل على الأفقى بشكل واضح ، فإن هذا يعزى إلى أن أحداث مابعد الترسيب أدت إلى ميلها . فإذا مال تتابع طبقي أكثر من الوضع الرأسىسمى التسابع الطبقي معكوس الوضع reversed ويكون وضع الطبقات مقلوبا overturned . وتعمل القوى التكتونية على إمالة وطى وتكسير الطبقات الصخرية الموجودة في القشرة الأرضية.

ويتم تحديد ترتيب الطبقات في التسابع الطبقي الرسوبى أن تحدد بشكل دقيق سمات السطح العلوى والسفلى للطبقات . وتكون هذه السمات عبارة عن



شكل (2.9): قاعدة المكتنفات Principle of inclusions

أ) الباثوليث أحدث عمرا من الحجر الرمل ، نظرا لأن الحجر الرمل قد تأثر بالحراوة عند سطح التماس مع الجرانيت ، كما أن الجرانيت يحتوي على مكتنفات Inclusions من الحجر الرمل .
ب) تدل مكتنفات الجرانيت في الحجر الرمل أن الباثوليث كان مصدر نشأة الحجر الرمل ، ولذلك فيعتبر الجرانيت أقدم عمرا من الحجر الرمل .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

و- قاعدة التتابع الحفرى Principle of fossil succession

لعبت قاعدة التتابع الحفرى دورا رئيسيا في تطور علم الجيولوجيا التاريخية، وهي تنص على أن كل طبقة أو مجموعة من الطبقات في التتابعات الرسوبية تحتوي على حفريات مميزة تختلف عما تحتها وما فوقها . وتمثل الحفريات fossils بقايا كائنات حية قديمة أو آثارها ، وهي تساعد كثيرا في تحديد العمر النسبي للصخور الرسوبية. وقد دعمت قاعدة التتابع الحفرى قاعدة التعاقب الطبقي كثيرا، لأن الحفريات ليست كالحبيبات غير العضوية تتواجد عشوائيا، وإنما تتواجد بنظام محدد يمكن تتبعه. فأنواع الصخور يمكن أن تتكرر كثيرا في التتابعات الطبقيّة الرأسية بتكرار ظروف الترسيب، بينما تتغير المجموعات الحفرية باطراد رأسيا ولا تتكرر أبدا بسبب نظام التطور الذي لا يعيد الكائن المنقرض مرة ثانية. ويسمى هذا الترتيب الطبقي للحفريات

بشكل صحيح، فإنها تدل على أن هذه المكتشفات عبارة عن أجزاء مما كان وحدة واحدة متصلة في الأساس.

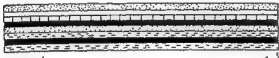
وتحمل الطبقات الرقيقة الواسعة الانتشار التي لها صفات خاصة مميزة أهمية زمنية ؛ أى تعبر عن لحظة زمنية محددة يمكن استخدامها كخطوط تعبر عن التساوى الزمنى عند إجراء المضاهاة . وتعتبر هذه الوحدات الفيزيائية المتماثلة متزامنة جيولوجيا على امتداد منطقة توأجدها ، مثل طبقات الرماد البركاني والتي تأخذ شكل الفريشة (الملاءة) blanket وترسب من التدفقات البركانية. وتقدم هذه الطبقات الدالة key or marker beds وسيلة مضمونة على نطاق شبه إقليمي لإجراء المضاهاة .

د- قاعدة علاقات القطع المستعرض cross-cutting relationships

من المبادئ المهمة المستخدمة في تحديد العمر النسبي قاعدة علاقات القطع المستعرض . ويدل مفهوم هذه القاعدة على أن أى شئ يقطع طبقة من الصخور الرسوبية أو أى نوع من الصخور يكون أحدث عمرا من الطبقة الرسوبية أو من تلك الصخور ، بمعنى أن القاطع يكون أحدث عمرا من المقطوع ، فأجسام الصخور النارية المتداخلة (مثل : القواطع dikes) والصدوع تقطع الصخور والتراكيب السابقة عليها في التكوين، وبالتالي فهي أحدث عمرا منها (شكل 1.9 ب).

هـ - قاعدة المكتنفات (المتداخلات) inclusions

وهي تنص على أن الفتات والحبيبات التي توجد في صخر تكون أقدم عمرا من الصخر نفسه. فإذا احتوت طبقة ما على فتات من طبقة أو جسم نارى مجاور كانت تلك الطبقة الأخيرة أو الجسم النارى أقدم عمرا والعكس صحيح (شكل 2.9).



شكل (3.9): المراحل المتتابعة لتكوّن عدم التوافق .

(After Holmes, D.L., 1984: Holmes Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson, Great Britain).

1- عدم التوافق التباينى **nonconformity** وهو

سطح طبقي يفصل بين صخور متبلورة (نارية أو متحولة) أقدم عمرا وأخرى رسوبية أحدث عمرا.

2- عدم التوافق الزاوى **angular unconformity**

وهو سطح تعرية يفصل بين مجموعتين من الطبقات مختلفتين في زاوية الميل.

3- عدم التوافق التخالفى **disconformity** وهو

نوع يصعب تعريفه، حيث يوجد سطح تعرية متعرج الشكل بين طبقات متوازية، وفيه يقطع سطح عدم التوافق أسطح الطباقية، ويكون الشاهد عليه وجود دليل على حدوث عملية تجوية

بالتتابع الحفرى (تتابع المجموعة الحيوانية faunal succession).

س- بصمات المغناطيسية الأرضية القديمة
Paleomagnetic signatures

من الإضافات المهمة التي حدثت في القرن العشرين إلى علم الطبقات اكتشاف بصمات المغناطيسية الأرضية القديمة **paleomagnetism** في الصخور. حيث يظهر في صخور التتابعات الطباقية تتابع من أحداث القطبية المغناطيسية (أى اتجاه المجال المغناطيسى للأرض في وقت ما)، من القطبية العادية **normal polarity** أى المماثلة لاتجاه المجال المغناطيسى الحالى للأرض والقطبية المعكوسة **reversed polarity** أى يكون اتجاه المجال المغناطيسى عكس اتجاه المجال الحالى، حيث يكون قطب الأرض الشمالى متجهًا نحو الجنوب الحالى. ولقد تعرض المجال المغناطيسى للأرض للانقلاب كثيرا طوال تاريخ الأرض الطويل، كما تغير موضع الأقطاب المغناطيسية كثيرا جدا أيضا بسبب حركة الكتل المتقاربة بالنسبة للأقطاب. وهذا يقدم وسائل أخرى لتقسيم التتابعات الطباقية، كما يمكن به إجراء المضاهاة بين التتابعات الطباقية المتباعدة أيضا.

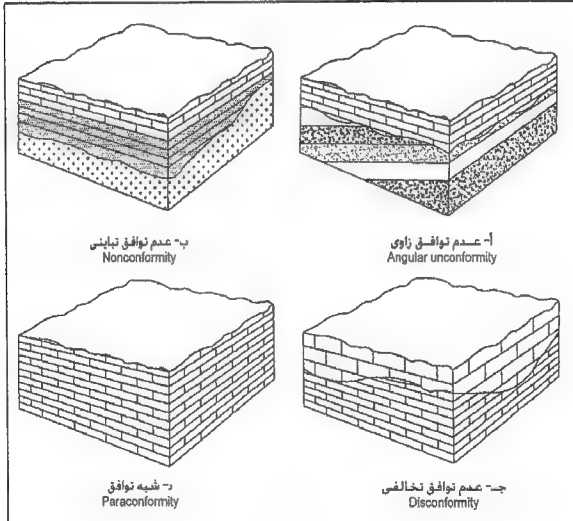
2- عدم التوافق

من الظواهر الطباقية المهمة التى تفيد كثيرا في تحديد العمر النسبى والتاريخ الجيولوجى ما يعرف بعلاقة عدم التوافق **unconformity**. ويعرف عدم التوافق بأنه سطح تعرية أو عدم ترسيب مدفون، وبالتالي فهو يعبر عن جزء مفقود من السجل الجيولوجى نتيجة التعرية وعدم الترسب (شكل 3.9). فعند عدم التوافق هو سطح بين طبقتين يفصل بينهما فاصل زمنى. ويمكن تعرف أربعة أنواع من عدم التوافق (شكل 4.9)، هى:

ويعبر عن الفترة الزمنية المقابلة لعدم التوافق بشغرة ترسب (الثلثة) **hiatus** ، وهى تساوى الفرق فى الزمن بين الصخور التى تقع فوق سطح عدم التوافق وتلك التى تقع تحته (شكل 6.9). وتجدر الإشارة إلى أن سطح عدم التوافق يمثل غيابا لفترة زمنية طويلة جيولوجيا. أما إذا كانت الفترة المفقودة من التسارع الطبقي قصيرة فإننا نشير إليها بالفصلة **diastem**. وفى العادة فإن عدم التوافق يشير إلى فقد لفترات زمنية تتراوح بين ملايين أو عشرات الملايين من السنين، بينما تعبر الفصلة عن فقد لفترات زمنية قصيرة نسبيا تصل إلى أسابيع أو شهور أو حتى قرون.

مثل وجود فترات من الصخور التى تليه فى الصخور التى تعلوه، مثل صخر الكونجلومرات.

4- شبه التوافق **paraconformity** وهو أصعب أنواع عدم التوافق، حيث يعتمد تعريفه على اختلاف عمر الطبقات التى تليه عن الطبقات التى تعلوه، ويكون الشاهد عليه اختلاف المحتوى الحفرى لكلا التسابعين أسفله وأعلىه. ويوضح شكل (5.9) عدم التوافق الزاوى فى المنطقة شمال حمام فرعون - سيناء - مصر، بينما يوضح شكل (5.9) عدم توافق تباينى فى الواحات البحرية بمصر.

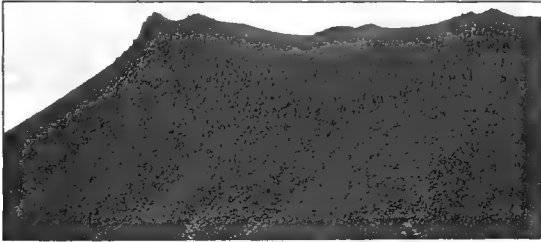


شكل (4.9): أنواع عدم التوافق .

وتسمح القواعد الأساسية السابق ذكرها بتحديد العمر النسبي بالنظر إلى مجموعة رأسية من الطبقات ، أو إلى أى تنابع طبقي (استراتجرافى) stratigraphic sequence- على أنه سجل مرتب زمنيا للتاريخ الجيولوجى لمنطقة ما . ويسمى الخط الزمنى المقابل والموضوع على أساس هذا التتابع بالزمن الجيولوجى geologic time ، وهو الممثل زمنيا لهذا التتابع ، أى كسجل جزئى كامل للوقت الذى انقضى منذ ترسبت



أ



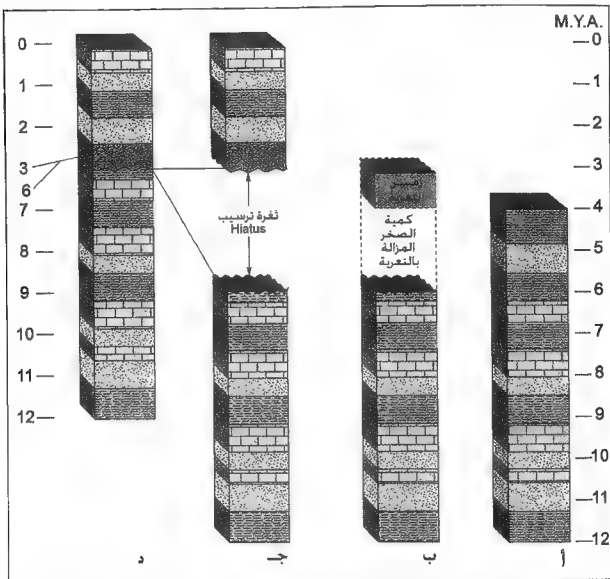
ب

شكل (5.9):

- (أ) عدم التوافق الزاوى angular unconformity وهو سطح تعرية يفصل بين مجموعتين من الطبقات مختلفتين في زاوية الميل . منطقة شمال حمام فرعون ، سيناء - مصر .
- (ب) عدم توافق تباينى nonconformity بين صخور رسوبية أقدم عمرا (العصر الطباشيرى Cretaceous) وصخور بركانية أحدث عمرا (العصر الثالث Tertiary) ، الواحات البحرية - مصر . (أ.د. محمد عبد القفور حسن ، هيئة المواد النووية).

المكتوب). وتختلف التتابعات الطبقة عن التتابعات الرسوبية التي تم مناقشتها في الفصل السابع. فالتتابعات الرسوبية هي تغيرات رأسية في التركيب الصخري للرواسب المتكونة في بيئة ترسيب واحدة. أما

أقدم الطبقات في أسفل التتابع إلى أحدث الطبقات في أعلى التتابع (يستخدم مصطلح الزمن الجيولوجي أيضا للإشارة إلى الفترة الزمنية الممتدة ، منذ انتهاء مرحلة تكوين الأرض ككوكب منفصل حتى بداية التاريخ



شكل (6.9): شكل مبسط لتوضيح عدم التوافق **unconformity** وثغرة الترسيب **hiatus**.

- أ. بدأ الترسيب قبل 12 مليون سنة مضت (M.Y.A.)، واستمر دون توقف تقريبا حتى قبل 4 ملايين سنة مضت.
- ب. بدأت فترة تعرية استمرت للمليون سنة تم خلالها تعرية طبقات تمثل 2 مليون سنة من التتابع الذي ترسب خلال الفترة الأولى.
- ج. وجدت ثغرة ترسيب **hiatus** تساوي ثلاثة ملايين من السنين بين مجموعتي الطبقات الأقدم، وتلك التي ترسبت خلال فترة ترسيب جديدة خلال الثلاثة ملايين سنة الأخيرة.

د. يمثل الشكل التتابع الطبقي الحقيقي، وفيه ستجد سطح عدم توافق يفصل بين مجموعتين من الطبقات، ويمثل فترة انقطاع في سجل الزمن الجيولوجي.

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company Minneapolis).

ويشمل ما يعرف بقانون المضاهاة القواعد التى وضعها سميث للمضاهاة بين التتابعات الطبقيّة . وينص هذا القانون على أن : "الطبقات التى لها نفس التركيب الصخرى والمعدنى والتى تحوى على حفريات متشابهة تنتمى إلى نفس العمر الجيولوجى " .

ويتضمن عمل المضاهاة هدفين أساسيين: الأول تحديد الأعمار النسبية للوحدات المنكشفة بالنسبة لبعضها البعض فى المنطقة التى يتم دراستها، والثانى عمل مقارنة بين أعمار الوحدات بالنسبة إلى مقياس الزمن الجيولوجى . ويتم مضاهاة الوحدات الصخرية بعدة طرق (شكل 7.9)، تشمل أنواع الصخور المتشابهة والوضع فى التتابع الطبقي والمحتوى الحفرى.

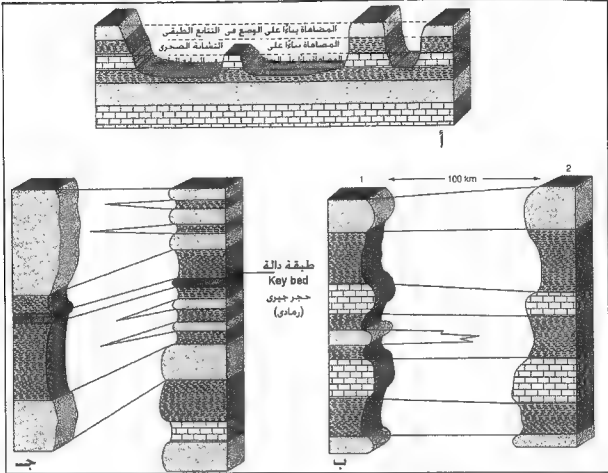
وتستخدم عميزات الصخور مثل اللون وحجم الحبيبات والتركيب الرسوبية التى تسمح بتمييز كل وحدة صخرية عن الأخرى عند عمل المضاهاة بين الوحدات الصخرية، خاصة إذا كانت المنكشفات كافية . ومن الأهمية بمكان معرفة أن عملية مضاهاة الصخور يقابلها الكثير من الصعوبات عند تطبيقها، لذلك يجب مراعاة القواعد التى وضعها الجيولوجيون بعد سميث للتوصل لعمل مضاهاة دقيقة . فيجب عند استخدام قاعدة الاستمرارية الجانبية lateral continuity principle مراعاة أن تلك الطريقة يمكن استخدامها عند المضاهاة فى حوض ترسيبى واحد ؛ لأنه من المعروف أن الطبقات الرسوبية تستدق وتنتهى عند حواف أحواض الترسيب، كما أنها قد تدرج إلى أنواع أخرى من الصخور نتيجة تغيرات السحنات (شكل 23.7) . كما يجب مراعاة أن الاعتماد على التشابه الصخرى فقط بين الطبقات لا يكفى كما ذكرنا إلا فى حالات خاصة جداً . كذلك يجب مراعاة الوضع التركيبى للطبقات ؛ حيث يمكن استخدام وضع الطبقات بالنسبة إلى تركيب تكتونى معين (مثل عدم

التتابع الطبقي فهو أشمل فى التعريف ويضم طبقات واسعة التغير لكل منها أصل مختلف . وبينما يتم التأكيد فى التتابعات الرسوبية على طبيعة الأنواع المتتابعة من الرواسب فإن التأكيد فى التتابعات الطبقيّة (الاسترجاعية) يكون على التتابع الزمنى للطبقات المكوّنة للتتابع وظروف الترسيب .

II. مضاهاة الوحدات الصخرية

تمكن المساح الإنجليزى وليام سميث William Smith عام 1793 م من تعرف أن الحفريات يمكن استخدامها لتحديد الأعمار النسبية للصخور الرسوبية . وقد لاحظ من خلال دراسة العديد من الحفريات أن الطبقات المختلفة كانت تحتوى على أنواع مختلفة من الحفريات ، وأنه يمكن تمييز طبقة عن الأخرى باستخدام الحفريات المميزة لكل طبقة . ويسمى هذا الترتيب الاسترجاعى فى الحفريات بالتتابع الحفرى faunal succession .

وقد فتح هذا الاكتشاف الباب لعمل مضاهاة للطبقات الرسوبية على مساحات أوسع . وتعنى المضاهاة correlation تحديد التنازل بين أجزاء وحدة استرجاعية مفصولة جغرافياً . وتشمل الوحدات الاسترجاعية طبقة أو مجموعة من الطبقات تتميز ببعض الخصائص الفيزيائية أو الكيميائية أو الحيوية . ولقد قام سميث فى بادئ الأمر بمضاهاة الطبقات على أساس التشابه فى الخواص الفيزيائية (التركيب الصخرى والمعدنى) ، بالإضافة إلى محتواها الحفرى وذلك على مسافات تبلغ عدة كيلومترات ، ثم بعد ذلك على مسافة عشرات الكيلومترات . ولقد أصبح من الممكن استخدام الحفريات وحدها فى عمل مضاهاة بين تتابعات تفصل بينها مئات أو آلاف الكيلومترات .



شكل (7.9): مضاهاة correlation الوحدات الصخرية

(أ) يسهل تتبع الوحدات الصخرية أفقياً في المناطق التي تكون فيها التتابعات الطباقية مكشوفة .
(ب) يمكن مضاهاة الوحدات الصخرية للتشابه في النوعية الصخرية والتشابه في الوضع في التتابع الطبقي ، ويتدرج الحجر الرملى جانبياً في القطع 1 إلى طفل في قطاع 2.

(ج) يمكن المضاهاة اعتماداً على الطبقة الدالة key bed ، وهى في هذه الحالة حجر جبرى ذو لون رمادى مميز .
(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

عند تقدير الزمن النسبى للطبقات . ويمكن استخدام بعض الأدلة مثل علامات النسيم والتطبيق المتدرج والتطبيق المتقاطع لتحديد ما إذا كانت الطبقات في الوضع الصحيح أم أنها قلبت شكل (13.10).

كما يمكن عمل المضاهاة بين الوحدات الصخرية عن طريق الوضع في التتابع الطبقي والطبقة الدالة key bed (شكل 7.9 ج) مثل طبقات الفحم والرماد البركاني . وتكون مثل هذه الطبقات مهمة عند عمل




التوافق (مثلاً) مما يساعد على مضاهاة الطبقات. ولكن قد تؤدى بعض الأوضاع التكتونية إلى تغيير وضع الطبقات مما لا يسمح بتطبيق قاعدة تعاقب الطبقات. فعند ملاحظة ميل الطبقات والتوائها في شكل (12.10) مثلما يحدث أثناء التصادم القارى ، فإن التشوه قد يكون كبيراً لدرجة أن الطبقات الأقدم قد تأتي فوق الطبقات الأحدث . وبالتالي فإن الاستنتاجات المبينة على الطبقات المقلوبة قد تؤدى قطعاً إلى نتائج غير صحيحة

index fossil . ولكي تكون الحفرية مرشدة ، فإنها يجب أن تكون شائعة في الطبقات ولها توزيع جغرافي واسع ، ومدى زمني محدود . ومن أحسن الأمثلة على الحفرية المرشدة الكائنات الحية الطافية والتي تتميز بتطور سريع وانتشار جغرافي واسع (شكل 8.9). وإذا تم تعرف حفرية دالة في منكشف ما ، فإن عملية المضاهاة تصبح سهلة وموثوق فيها. ويمكن بذلك عمل مضاهاة باستخدام التتابع الحفري (شكل 9.9) fossil succession

مضاهاة بين تنابعات صخرية ؛ خاصة على نطاق إقليمي .

وتستخدم الحفريات للدلالة على زمن الوحدات الصخرية ، حيث تمثل تلك الحفريات بقايا لكائنات حية عاشت لفترة زمنية خلال الزمن الجيولوجي الماضي.

وتسمى الحفرية التي تستخدم في تحديد عمر الطبقات التي تحتويها ، بالحفرية المرشدة (الدالة)

الحياة الحديثة Cenozoic	الثالث Tertiary		
الحياة الحديثة Cenozoic	الطباشيري Cretaceous		إنوسيرموس Inoceramus
	الجوراسي Jurassic		لنجيولا Lingula
	الترياسي Triassic		
الحياة القديمة Paleozoic	البرمي Permian		
	البنسلفاني Pennsylvanian		
	الميسيسيبي Mississippian		
	الديفوني Devonian		
	السيلوري Silurian		
	الأوردوفيشي Ordovician		أيزوتيلوس Isotelus
	الكمبري Cambrian		

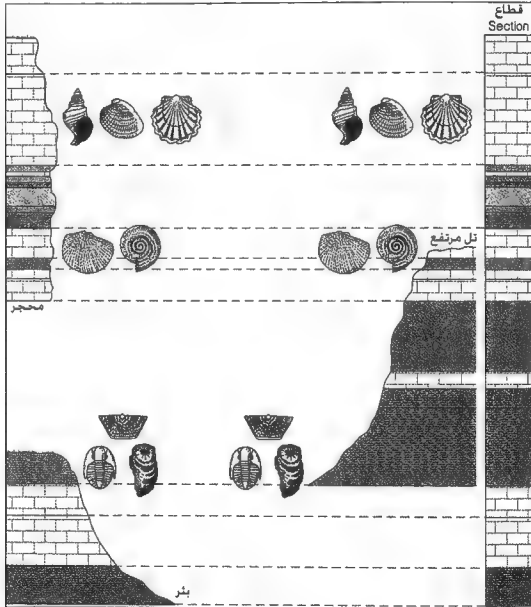
شكل (8.9): المدى الزمني لثلاث حفريات ، يوضح أن جنس لنجيولا *Lingula* من المرجحيات له قيمة محدودة في المضاهاة بسبب طول مداه الزمني الكبير ، بينما يعتبر جنس أيزوتيلوس *Isotelus* من ثلاثية الفصوص وجنس إنوسيرموس *Inoceramus* من المحاريات من الحفريات المرشدة لأن لها انتشارا جغرافيا واسعا وسهل تعرفها ولها مدى زمني قصير .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

cores التي يتم الحصول عليها من الآبار، وأيضا شظايا الحفر cuttings التي تخرج إلى السطح أثناء حفر الآبار.

وقد استطاع الجيولوجيون خلال القرنين الماضيين باستخدام التتابعات الحفرية والتتابعات الاسترجاعية أن يضاهاوا المكونات في جميع أنحاء العالم ليخرجوا

وبالإضافة إلى المضاهاة بين الوحدات الصخرية المنكشفة فوق سطح الأرض، فإنه يمكن المضاهاة بين الوحدات الصخرية تحت السطحية عند البحث عن المعادن والفحم والبتروول باستخدام تسجيلات الآبار well logs التي توضح الخصائص الفيزيائية المقاسة للقطاع الصخري أثناء الحفر، والعينات الأسطوانية



شكل (9.9): المضاهاة باستخدام التتابع الحفرى Fossil succession. تضاهاى مجموعات الطبقات التي تنتمى إلى العمر الجيولوجي نفسه، والتي توجد منكشفة في معجر أو تل مرتفع أو آبار تحت سطحية بناء على احتوائها على المجموعة نفسها من الحفريات. وبعد أن يتم إجراء المضاهاة يمكن عمل قطاع section كامل للتتابع في المنطقة بوضوح الأعمار النسبية لكل الطبقات، والذي يظهر على الجانب الأيمن للشكل. (After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

بنتيجة هذا الجهد، وهو مقياس الزمن الجيولوجي لكل الأرض.

III. العمر المطلق

ناقشنا حتى الآن القواعد التي يمكن على أساسها ترتيب التتابعات الطبقة كما تستنتج من قوانين علم الطبقات المختلفة مثل: التعاقب الطبقي وعلاقات القطع المستعرض والتتابع الحفرى وغيرها. إلا أن مقياس الزمن الجيولوجي لا يشتمل فقط على مقياس نسبي ولكنه يشمل أيضا مقياسًا مطلقًا مقدرًا بالسنين من الآن، ومتراكبًا مع القياس النسبي. وعلى الرغم من أنه مقدر بالسنين (عادة بالملايين Ma) من الآن، إلا أنه ليس تقديرًا دقيقًا بالمعنى الحقيقي، نظرًا لوجود نسبة بسيطة من الخطأ في الحسابات. فإن تقديرًا مطلقًا مثل 4600 مليون سنة من الآن والممثل لعمر الأرض، أو 245 مليون سنة من الآن والممثل للحد الفاصل بين حقبة الحياة القديمة والوسطى يعطينا تقديرًا للدرجة القدم، كما يحدد المدى الزمني لتقسيمات العمود الجيولوجي النسبية.

ويلاحظ أن مقياس الزمن النسبي قد بنى تدريجيًا حتى أخذ شكله الحالي بنهاية القرن التاسع عشر. أما مقياس العمر المطلق، فقد تطور من خلال علم الزمن الجيولوجي Geochronology والذي أصبح حقيقة واقعة في العقود الأولى من القرن العشرين بعد اكتشاف ظاهرة نشاط الإشعاع الذري radioactivity وتطبيقاتها على المعادن. وقد استمر تطبيق كلا المقياسين حتى اليوم. ويعتبر المقياسان النسبي والمطلق من الإنجازات المهمة في تاريخ العلم.

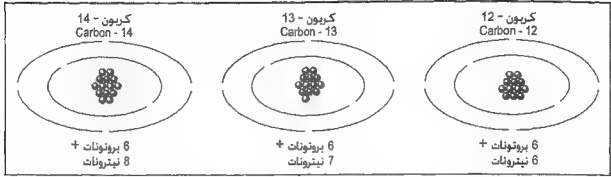
أ- أسس التقدير الإشعاعي

يبنى التقدير الإشعاعي على ظاهرة أن هناك كثيرًا من الذرات غير الثابتة، وبالتالي التغير باستمرار إلى

حالة أكثر ثباتًا وأقل طاقة. ويترتب على عملية التغير هذه اضمحلال إشعاعي radioactive decay، يؤدي بدوره إلى انبعاثات إشعاعية radioactive emissions. وتختلف الذرات عن بعضها بعضًا، والتي تدعى نويات nuclides في عدد البروتونات (جسيمات مشحونة بشحنة موجبة) والنيوترونات (جسيمات متعادلة الشحنة) الموجودة في نواة الذرة.

ويعرف كل عنصر كيميائي في الجدول الدوري بعدد البروتونات في النواة، وهو عدد ثابت و مميز لكل عنصر، والتي تمثل العدد الذري atomic number. فعلى سبيل المثال، عنصر الهيليوم (He) وهو العنصر الثاني في الجدول الدوري يحتوي على بروتونين في نواته، بينما يحتوي عنصر اليورانيوم، والذي يحمل رقم 92 في الجدول الدوري على 92 بروتونًا في نواته. أما رقم الكتلة mass number فهو عدد البروتونات مضافًا إليه عدد النيوترونات الموجودة في نواة الذرة. أما المدارات حول النواة فتتملأ بالإلكترونات (جسيمات مشحونة بشحنة سالبة)، والتي يساوي عددها عدد البروتونات الموجودة في نواة الذرة. وبالتالي فإن لكل نوية nuclide عددا ذريا مميزا.

وكل عنصر كيميائي، والذي هو عبارة عن نوية لها عدد ذري ثابت، يمكن أن يكون له أشكال مختلفة تدعى نظائر isotopes، والتي تتميز بناءً على عدد النيوترونات الموجودة داخل نوياتها. وبالتالي فإن النظائر المختلفة للعنصر نفسه يكون لكل نظير منها رقم كتلة مختلف (شكل 10.9). فاليورانيوم -235 ونظيره اليورانيوم -238 يحتويان على عدد البروتونات نفسه، بينما يختلفان في عدد النيوترونات (وبالتالي لهما رقبا كتلة مختلفان). ويلعب هذان النظيران دورا مهمًا في تقدير العمر المطلق لبعض أنواع الصخور النارية.



شكل (10.9): نظائر الكربون الثلاثة. لاحظ أن النظائر الثلاثة تحتوي نواتها على ستة بروتونات، كما توجد ستة إلكترونات في مستويات الطاقة بها. وتختلف عن بعضها بعضاً في عدد النيوترونات التي يحتويها كل نظير.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

الذاتي لهذه العناصر كانت سريعة. ومع ذلك فما زال يوجد حتى الآن القليل من النظائر المشعة والتي تتحول ببطء. ولقد بينت الدراسة المعملية الدقيقة للنظائر المشعة أن معدلات الاضمحلال لا تتأثر بأية تغيرات في البيئة الطبيعية أو الكيميائية. ولذلك لا يتغير معدل الاضمحلال لنظير ما سواء كان في الوشاح أو في الصحارة أو في الصخر الرسوبي، وهذه نقطة مهمة توضح أن معدلات الاضمحلال الإشعاعي لا تتأثر بأية عمليات جيولوجية.

ويرتب على الاضمحلال الإشعاعي: (1) انطلاق جسيمات ألفا (انطلاق بروتونين ونيوترونين من نواة الذرة)، (2) انطلاق جسيمات بيتا (انطلاق إلكترون من نواة عالية من النواة)، (3) كما قد تكتسب النواة إلكترونات من خارجها (شكل 11.9). ويرتب على الاضمحلال الإشعاعي بانطلاق جسيمات ألفا أن تفقد نواة العنصر الولود بروتونين ونيوترونين، ويتكون نظير وليد جديد يقل عدد الكتلة فيه بمقدار 4، كما يقل العدد الذري فيه بمقدار 2 عن النظير الولود. بينما في الاضمحلال الإشعاعي، فإن انطلاق جسيمات بيتا، يجعل النواة تطلق إلكترونات ويتحول أحد النيوترونات فيها إلى بروتون، وبالتالي تبقى كتلة النواة ثابتة، بينما

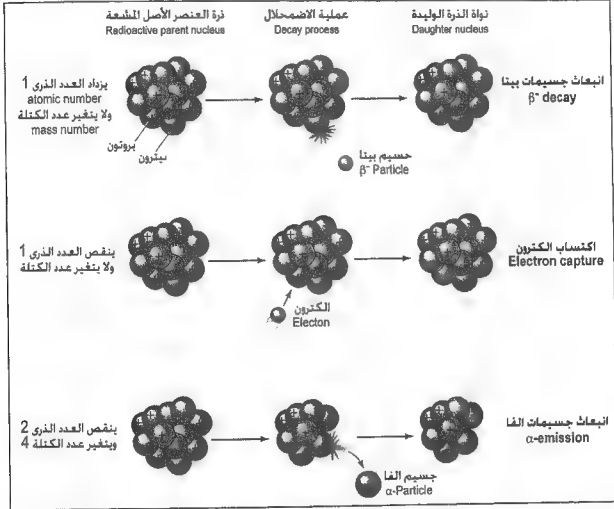
ومعظم نظائر العناصر الكيميائية الموجودة في الأرض هي عناصر مستقرة وغير معرضة للتحويل. ولكن هناك عدداً قليلاً من النظائر مثل ^{14}C تكون مشعة بسبب عدم استقرار النواة، حيث إن هناك حدوداً يمكن أن تتغير فيها أعداد الكتلة للنظائر لأي عنصر. وتتغير نواة النظير المشع ذاتياً إما إلى نواة نظير أكثر استقراراً للعنصر الكيميائي نفسه وإما إلى نظير لعنصر كيميائي مختلف. وتختلف سرعة التحول لكل نظير. وعلى الرغم من أن هذه العملية هي واحدة من التحولات - من نواة غير ثابتة إلى نواة أخرى أكثر ثباتاً - إلا أنه أصبح من الشائع تسمية هذه العملية بالاضمحلال الإشعاعي **radioactive decay** كما سبق أن ذكرنا. ويسمى العنصر الذي تضمحل نواته إشعاعياً بالأصل (ولود) **parent**، ويسمى الناتج من الاضمحلال الإشعاعي بالوليد **daughter**. ويضمحل ^{14}C إلى ^{14}N ويضمحل ^{238}U إلى ^{206}Pb ، ويسمى كل من ^{14}C و ^{238}U أصلاً (ولوداً) و ^{14}N و ^{206}Pb وليداً.

ب- الاضمحلال الإشعاعي

إن عديداً من النظائر المشعة والتي كانت موجودة يوماً ما في الأرض قد اضمحل ولم يبق لها وجود الآن. ويرجع السبب في ذلك إلى أن معدلات الاضمحلال

يزيد العدد الذرى بمقدار 1 ويتكون نظير جديد . وفى حالة اكتساب إلكترون، يلتقط أحد بروتونات نواة العنصر إلكترونًا من المدار الخارجى ويتحول إلى نيوترون ، مما يترتب عليه نقص العدد الذرى بمقدار 1 ، ويتكون نظير جديد ، بينما تبقى الكتلة ثابتة.

خطوات تحليل بيتا. وبغض النظر عن أى تعقيدات ، فإن القانون الأساسى فى الاضمحلال الإشعاعى ثابت، وهو "نسبة الذرات الأصل (الولودة) التى تضمحل إشعاعيا أثناء كل وحدة زمنية هى دائما النسبة نفسها" . ومن المهم أن نعرف أن معدل التحلل أو الاضمحلال الإشعاعى rate of radioactive



شكل (11.9): طرق الاضمحلال الإشعاعى ، ويلاحظ أن العدد الذرى (عدد البروتونات) للعنصر الوليد daughter يختلف عن العدد الذرى للعنصر الأصل parent فى كل حالة .

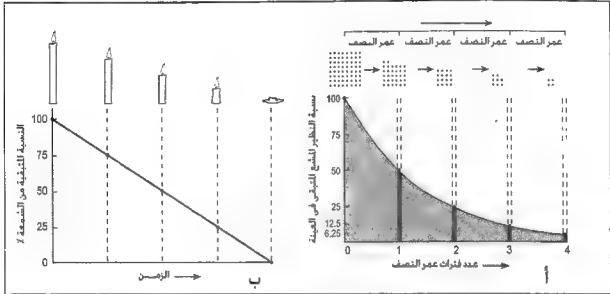
(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

decay من عنصر ولود لنظيره الوليد يكون بمعدل ثابت لا يتغير، يسمى ثابت التحلل. وكما هو معروف فى علم المعادن، فإذا دخلت نوية مشعة فى تركيب معدن عند تبلوره، فإن كمية النظير المشع (النواة الأصل أو الرصاص -206 من خلال 10 خطوات تحلل ألفا و

معدل الاضمحلال الإشعاعى: تضمحل العناصر المشعة إلى نظائرها غير المشعة بانطلاق نواتج تحلل محددة. فمثلا يتحلل عنصر اليورانيوم -238 إلى الرصاص -206 من خلال 10 خطوات تحلل ألفا و

(N/4) سيقي مشعا بعد مرور فترة عمر نصف أخرى، وبعد مرور فترة عمر نصف أخرى سيتبقى ثُمن الكمية الأصلية (N/8)، وهكذا إلى مالا نهاية (شكل 12.9).

الوليدة) والتي تتحلل إلى النظير غير المشع (النواة الوليدة) مثل تحول اليورانيوم -238 إلى رصاص -206، هو معامل فقط في الفترة الزمنية اللازمة للتحول. إلا أنه لدقة المعلومات، فإنه من المحتم أن



شكل (12.9):

أ. منحنى الاضمحلال الإشعاعي، والذي يستخدم في تحديد عمر صخر بمضاهاة نسبة النظير المشع المتبقى إلى الكمية الأصلية في العينة. وتمثل الأعمدة الأعمق لونا كمية المادة المشعة المتبقية بعد كل فترة عمر نصف، بينما تمثل الأعمدة الملهشة كمية المادة التي تحولت إلى النظير غير المشع. أما عدد النقاط في المربعات فوق الشكل فيشير إلى عدد الذرات المشعة المتبقية.

ب. للمقارنة بين منحنى الاضمحلال الإشعاعي والمنحنى الخطي لاحتراق شمعة.

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

ويقدر عمر العينة الجيولوجية بالفترة الزمنية المتقضية منذ تبلور الشبكة البلورية للمعدن الحاوي للذرات المشعة. ويكون العمر عند لحظة البداية صفرا، وتكون نسبة ذرات النظير المشع لذرات النظير غير المشع عندئذٍ تساوى صفرا. وتقدر الفترة الزمنية منذ التبلور بقياس نسبة نويات النظير المشع إلى نويات النظير غير المشع في المعدن. وبالطبع فإن عمر النصف للعنصر المشع يجب أن يكون معلوما ويضرب في نسبة نويات النظير المشع إلى نويات النظير غير المشع.

وعلى سبيل المثال، فإذا كانت نسبة اليورانيوم-238 إلى الرصاص -206 في عينة ما تساوى 1:1، فهذا يعنى أن نصف المادة الأصلية من اليورانيوم قد تحللت

تكون كل من النواتين الولودة والوليدة محفوظة في بناء الشبكة البلورية للمعدن. وتعكس نسبة النويات الولودة إلى النويات الوليدة في النظام البلورى المغلق طول الفترة الزمنية المتقضية منذ بدأت الساعة الزمنية في الدوران.

ويتميز كل عنصر مشع بفترة زمنية تسمى عمر النصف **half-life**، وهي الفترة الزمنية اللازمة لأن يتحول نصف عدد ذرات عنصر مشع ما إلى النظير غير المشع. ويحدث التحلل الإشعاعي بمعدل هندسى: أى أن عدداً ما من نويات عنصر مشع معين (N_0) يتبقى نصف عددها مشعا ($N/2$) بعد مرور فترة عمر نصف واحدة، بينما نصف هذا العدد، أى ربع العدد الأصلي

أما الصخور الرسوبية فليست مناسبة للتقدير المطلق باستخدام العناصر المشعة، لأن الحبيبات الفتاتية المكوّنة لها يكون مصدرها أساساً صخور نارية أو متحولة أقدم عمراً. وتقدير عمر زيركون أو ميكروكلين فتاتي سيكون هو عمر الصخر الأصلي الناري أو المتحول الذي أتى منه الزيركون أو الميكروكلين وليس عمر الصخر الرسوبي نفسه. أما معدن الجلوكونيت، والذي يتكون من سيليكات بوتاسيوم حديد لونها أخضر، فإنه يتكون كمعدن أولى في بعض بيئات الترسيب البحرية، ويمكن أن يعطى تقديرات مقبولة للعمر المطلق لبعض الصخور الرسوبية من خلال احتوائه على بوتاسيوم-أرجون.

مصادر الخطأ: تأتي أفضل تقديرات العمر المطلق من ربط نتائج سلسلتى اضمحلال بعضها ببعض. فإذا بقيت بلورة تحتوي على عنصر اليورانيوم في نظام بلوري مغلق فإن نتائج تقدير عمرها من نسب اليورانيوم-238: الرصاص-206 واليورانيوم-235: الرصاص-207 ستكون متطابقة. وتأتي أكبر مصادر عدم دقة النتائج في علم التاريخ الجيولوجي من أن الصخور والمعادن لا تبقى في أنظمة مغلقة، حيث تفقد النويات الوليدة غالباً مثل الأرجون-40 (لأن الأرجون غاز ومن السهل تطايره). كما قد تختلط النويات الوليدة الناتجة عن الاضمحلال الإشعاعي بنويات العنصر نفسه المتكونة أصلاً عند تبلور المعدن في البداية، مثل نويات الرصاص الناتج عن الاضمحلال (رصاص-206 ورصاص-207 ورصاص-208) والرصاص غير المشع المتكون عند التبلور والمسمى رصاص-204. ولذلك فلا بد أن تحدد كميته بدقة في العينة، قبل عمل النسبة التي يبنى على أساسها تقدير العمر.

إلى رصاص، أي مضت فترة عمر نصف واحدة، وحيث إن عمر النصف لليورانيوم-238 هو 4510 مليون سنة، فإن هذا سيكون عمر العينة.

ج- سلاسل الاضمحلال الإشعاعي الرئيسية

تُقدّر عمر النصف للنويات المشعة المختلفة باستخدام أدوات تحليل دقيقة في المعمل. ووجد أن عمر النصف لبعض العناصر يكون أقل من ثانية، بينما يصل عمر بعضها إلى دقائق أو أيام أو سنوات، ويصل في بعضها الآخر إلى عشرات أو مئات أو حتى آلاف الملايين من السنين؛ فلسلسلة تحلل اليورانيوم-238 يتراوح عمر النصف فيها بين 0.00016 ثانية و4500 مليون سنة. ويحتاج تقدير عمر معظم الأحداث الجيولوجية باستخدام المواد المشعة إلى العناصر المشعة التي لها عمر نصف طويل. ويوضح جدول (1.9) النظائر المشعة الرئيسية المستخدمة في تقدير عمر الصخور القديمة ونظائرها غير المشعة وعمر النصف لها والمعادن أو الصخور الرئيسية التي تحوي هذه العناصر وبعض تطبيقاتها المهمة.

ويعتبر عمر الصخور النارية والمتحولة هو عمر الانصهار حتى نقطة حرجية أساسية يُطلق عليها درجة حرارة التثبيت blocking temperature، حيث يصبح معدن معين نظاماً كيميائياً مغلقاً في سلسلة اضمحلال معينة. وتعطى الصخور النارية أفضل النتائج؛ لأن صخور هذه المجموعة هي نواتج تبلور مصهور سيليكاتي، ولهذا فهي صخور أولية. كما أن الصخور المتحولة يمكن أن تعطى أعماراً مطلقة أيضاً، ولكن يكون العمر المقدر بهذه الطريقة هو عمر التحول، ولذلك فهي لا تعطى عمر الصخر الأصلي غير المتحول. وتشمل عمليات التحول إعادة بلورة المعادن الموجودة وأيضاً تكوين معادن جديدة، ولذلك فإنها تعيد ضبط ساعة الزمن على البداية الجديدة.

جدول (1.9) أهم العناصر المشعة المستخدمة في تقدير أعمار الصخور والأحداث الجيولوجية

النظائر	عمر النصف التقريبي	المعادن الرتيبة الحايوة للعنصر المشع	التطبيقات
يورانيوم-238	رصاص-206	4510 مليون سنة	تحديد أعمار عينات من القمر والشهب وصخور ما قبل الكمبري
يورانيوم-235	رصاص-207	713 مليون سنة	مثل يورانيوم-238
يورانيوم-232	رصاص-208	13900 مليون سنة	مثل يورانيوم-238
بوتاسيوم-40	أرجون-40	1300 مليون سنة	تحديد أعمار بازلت قيعان المحيطات واللايتا وبعض الصخور الرسوبية
روبيديوم-87	استرانشيوم-87	47000 مليون سنة	تحديد أعمار أقدم صخور القشرة الأرضية والشهب وصخور ما قبل الكمبري
كربون-14	نيتروجين-14	5730 سنة	تحديد أعمار عينات من العصر الرابع (الجزء الأخير) وبقايا الحضارات البشرية

مليون سنة مثلاً وهو تقدير يقع في مدى العمر السابق، وبالتالي فإن الدقة هي مقياس درجة بُعد العمر المقدر عن العمر الحقيقي.

د- تحديد العمر باستخدام الكربون المشع

الكربون عنصر مهم في الطبيعة، وأيضاً في تقدير عمر المواد العضوية الحديثة جداً. وتحتوي ذرة الكربون العادية على ستة بروتونات وستة نيوترونات في نواتها، ولهذا فإن عددها الذري 6 ووزنها الذري 12. وللكربون نظيران هما كربون ^{13}C وكربون ^{14}C ويتفاعلان كيميائياً مثل الكربون ^{12}C تماماً، وكربون 12 و 13 مستقران بينما يكون كربون 14 مشعاً. ويختلط ^{14}C مع ^{12}C و ^{13}C ويتشرب بسرعة في الغلاف الجوي والغلاف المائي والغلاف الحيوي. وترجع أهمية ذلك إلى أن النباتات والحيوانات لا تستطيع التمييز بين مختلف أنواع الكربون، وبالتالي تستخدمها جميعاً دون تمييز في تصنيع مختلف المواد العضوية كالسيليلوز أو

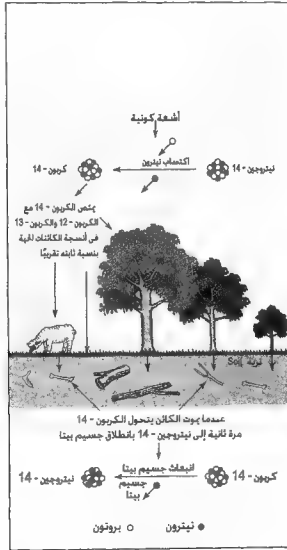
كما قد ينشأ الخطأ أيضاً من معامل التحليل نفسها. فتحديد نسبة النويات الولودة إلى النويات الوليدة يتم باستخدام جهاز يطلق عليه مطياف الكتلة mass spectograph، وهو جهاز تحليل على درجة عالية من الحساسية قادر على فصل وقياس نسب الجسيمات الدقيقة حسب الفروق في كتلتها. وتعتمد درجة الخطأ على كمية النظير المشع والنظير غير المشع وقرينه المتكون عند التبلور الأصلي، وأيضاً عمر نصف العنصر الولود والعمر الحقيقي للعينة المدروسة.

ولهذا فإن العمر المطلق يعبر عنه برقم مع إضافة زيادة أو نقص إلى هذا الرقم، فمثلاً يكون عمر حدث جيولوجي 250 ± 20 مليون سنة. وبالإضافة إلى الأخطاء الروتينية وأخطاء التحليل، فإن مدى العمر الناتج يعبر عن درجة دقة القياس، مثل عينة يتراوح عمرها بين 460 و 490 مليون سنة، وبالتالي فإنك قد تحلل عينة من الصخر نفسه، ويكون عمرها نحو 480

Radiocarbon dating على تحديد نسبة كربون 14 إلى كربون 12 لتقدير عمر المواد التي كانت حية يوما ما ، حيث تتمص كل الكائنات الحية كربون 14 المشع مع كربون 12 وكربون 13 بنسبة ثابتة تقريبا . ولهذا فإن معرفة عمر النصف للكربون 14 والتي تساوى 5730 سنة ، ومعرفة ثابت التحلل يجعل عملية حساب زمن موت نبات أو حيوان ما عملية سهلة ، من خلال قياس كمية الكربون 14 في البقايا المتحفرة. ويقتصر استخدام طريقة الكربون المشع على حد

فوسفات الكالسيوم في العظام والأسنان وكربونات الكالسيوم في الأصداف. ويكون كربون C^{14} غير ثابت ويضمحل بفقد جسيم بيتا من نوياته، ويتكون نتيجة لذلك نواة وليدة هي النيتروجين 14 (شكل 13.9).

ولا يحسب عمر المواد الحاقية للكربون من حساب نسبة الولود (الكربون 14): نسبة الوليد (النيتروجين 14) كما هو الحال في تقدير العمر من نسبة اليورانيوم - رصاص. ويعتمد الأساس الذي يقوم عليه تقدير العمر المطلق باستخدام الكربون المشع



شكل (13.9): دورة الكربون ، والتي توضح تكوين وانتشار dispersal وتحلل decay الكربون 14 .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

الذى سلكته، والذي يكون سعته ذرات قليلة. ويكون المعدل الطبيعي لإنتاج مسارات الانشطار في ذرات اليورانيوم شديد البطء، ويحدث بمعدل ثابت. وبحساب عدد مسارات الانشطار يمكن تحديد عدد الذرات التى اضمحلت فعلا، وبتعريض البلورة لمجال نيوترونى يحدث اضمحلال لبقية الذرات، ثم يعاد عدّ مسارات الانشطار مرة ثانية، وبإيجاد النسبة بين الذرات الوليدة الأولى والذرات الولودة يمكن حساب العمر المطلق.

ويبدو أن معادن مثل الأباتيت والزيركون والسفين تعطى نتائج جيدة، كما أن هذه الطريقة تستخدم لتحديد أعمار عينات يقل عمرها عن عدة قرون من السنين، كما تستخدم لتحديد أعمار صخور يصل عمرها إلى عدة بلايين من السنين، إلا أنها أكثر استخداما لتقدير عمر عينات تتراوح بين نحو 40000 سنة إلى مليون سنة مضت، وهى فترة زمنية لا تستخدم فيها التقنيات الأخرى بصورة عملية. ولكن هذه الطريقة كغيرها من طرق قياس العمر المطلق لها عوامل محددة. فدرجات الحرارة العالية يمكن أن تؤدى إلى اختفاء المسارات، كما يمكن أن يؤدى قذف الأشعة الكونية إلى زيادة سرعة الانشطار، مما يؤدى إلى تقديرات خاطئة.

و- تحديد العمر باستخدام الأحماض الأمينية

إن تحديد العمر المطلق باستخدام الأحماض الأمينية amino acids dating يعتبر طريقة أخرى حديثة، تعتمد على تحليل نسبة الحمض الأميني D- إلى الحمض الأميني L- في عظام حفريات ومواد أصداف العصر الرابع Quaternary، حيث ثبت جدواها. وقد أثبتت الأبحاث التى أجريت في سبعينيات القرن الماضى أن عملية تدعى تفاعل ريسمة الحمض الأميني amino acid racemization reaction يمكن استخدامها بمحاذير معينة، عند تحديد عمر

أقصى للعمر لا يزيد عن 70000 سنة، نظرا لقصر فترة عمر النصف له. ويعتبر الكربون المشع طريقة أساسية لعلم الآثار القديمة وجيلوجية البليستوسين. ومن التطبيقات المبكرة لهذه الطريقة بعد إجازة الطريقة عام 1947م تقدير العمر الدقيق لرحف الجليد القارى فوق أمريكا الشمالية. وقد أظهرت النتائج حدوث التغطية الجليدية قبل 11400 سنة مضت، وهو تقدير يقل بمقدار النصف عن التقدير، الذى سبق التوصل إليه من استخدام الشواهد الطباقية.

وهناك نظيران مشعان آخران قصيرا العمر استخدمتا بنجاح في تقدير عمر الأحداث الجيولوجية الحديثة وهما الثوريوم-230 والبروتكتينيوم-231. فالثوريوم-230 ينتج في سلسلة تحلل اليورانيوم-238 وعمر النصف له 75000 سنة. أما البروتكتينيوم-231 فينتج في سلسلة تحلل اليورانيوم-235 وله عمر نصف 34000 سنة. ويتجمع كلاهما في رواسب قاع البحر، وقياس تركيزهما النسبى أو نسبتهما المقارنة في الطبقات المختلفة للعينات الأسطوانية أثناء حفر بشر ومقارنتها بمحتواهما في طبقة سطحية يمكن تحديد عمر الطبقات.

٨- تحديد العمر باستخدام مسارات الانشطار

يمكن استخدام مسارات الانشطار النووي fission track dating كطريقة حديثة لتقدير العمر المطلق ثبت نجاحها. وهى عبارة عن ندوب تشبه الأنفاق الدقيقة للغاية التى لا ترى إلا تحت تكبيرات عالية في بعض بلورات المعادن. وتنتج هذه المسارات عندما تنطلق بعض الجسيمات عالية الطاقة من نويات ذرات اليورانيوم-238 أثناء الانشطار اللحظى إلى نواتين أو أكثر أخف وزنا، بالإضافة إلى بعض الجسيمات النووية. وتنطلق الجسيمات داخل تركيب الشبكة البلورية للمعدن تاركة بصمة للمسار

المقياس العالمى، أو يتم إدخال تحسينات عليه حتى الآن، نتيجة وصف أو رسم خرائط لوحات صخرية أكثر.

ويقسم الجيولوجيون كل التاريخ الجيولوجى إلى وحدات مختلفة المدى الزمنى تقابل الوحدات الصخرية للعمود الجيولوجى، وتشمل في مجموعها مقياس الزمن الجيولوجى **geologic time scale** لتاريخ الأرض (جدول 2.9). وقد أدخلت وحدات مقياس الزمن الرئيسية خلال القرن التاسع عشر على يد علماء من غرب أوروبا وبريطانيا ؛ ونظراً لأن تحديد العمر المطلق باستخدام المواد المشعة لم يكن معروفاً في ذلك الوقت، فإن مقياس الزمن قد أقيم باستخدام طرق قياس العمر النسبى. وقد أضيفت التقديرات المطلقة لوحات مقياس الزمن بعد إجازتها في القرن العشرين.

أ- بناء مقياس الزمن الجيولوجى

يقسم مقياس الزمن الجيولوجى 4.6 بليون سنة والتي تمثل تاريخ الأرض إلى وحدات مختلفة وهى الدهور والأحقاب والعصور والأحايين ، ويقدم إطاراً زمنياً معقولاً ترتب داخله الأحداث الجيولوجية المختلفة منذ نشأة الأرض وإلى الآن. وكما يتضح من شكل مقياس الزمن الجيولوجى ، فإن الدهور **eons** هى أكبر وحدات الزمن . ويشمل الدهر الذى بدأ قبل 570 مليون سنة دهر الحياة الظاهرة **Phanerozoic Eon** وهو مصطلح مشتق من الكلمات اللاتينية التى تعنى حياة ظاهرة ، وهو وصف مناسب ؛ لأن صخور ورواسب ذلك الدهر تحوى الكثير من الحفريات التى تسجل الاتجاهات التطورية الرئيسية في الحياة .

ويقسم دهر الحياة الظاهرة إلى ثلاثة أحقاب **eras** هى : حقبة الحياة القديمة **Paleozoic Era** (يعنى مقطع **paleo** قديم ويعنى مقطع **zoë** حياة)، وحقبة الحياة المتوسطة **Mesozoic Era** (يعنى مقطع

مادة هيكلية ، حيث إن الأحماض الأمينية المعروفة بـ **L-amino acids** توجد فقط في بروتينات الكائنات الحية . وعندما يموت الكائن وتمضى فترة زمنية تتحول هذه **L-amino acids** إلى الأحماض الأمينية غير البروتينية والمعروفة بـ **D-amino acids** خلال عملية تعرف بالريسة **racemization** . وتزيد بنبات نسبة **D-amino acids** إلى **L-amino acids** في المادة الهيكلية مع الزمن حتى تصل هذه النسبة **L/D** إلى 1.0 . أما إذا زادت عن ذلك فتصبح النسبة زائفة ؛ لأنه عكس سلاسل الاضمحلال الإشعاعى فإن التفاعل يكون عكسياً . وتحديد المدى الذى وصلت إليه عملية الريسة في عينة المادة الهيكلية ، يمكن تحديد عمرها، أخذين في الاعتبار أنه يمكن معايرة العينة بعينة أخرى محددة العمر سلفاً.

وبمقارنة طريقة الريسة هذه بطريقة الكربون المشع، يتضح أننا نحتاج في هذه الطريقة إلى مقدار أقل من المادة العضوية ، كما تطبق في مجالات أوسع من طريقة الكربون المشع . فهى تطبق في تحديد أعمار الحفريات البشرية المبكرة والشرفات البحرية ، التى تكونت خلال مئات الآلاف من السنين الأخيرة .

IV. العمود الجيولوجى ومقياس الزمن الجيولوجى

إن أحد الإنجازات الكبيرة التى توصل إليها جيولوجيو القرن التاسع عشر من خلال عملية المضاهاة أنه يمكن الربط بين التابعات الطبقيّة التابعة لزمن واحد. ولقد تمكن هؤلاء الجيولوجيون - ومن خلال عملية المضاهاة على مستوى العالم - من جمع عمود جيولوجى **geologic column** ، هو عبارة عن قطاع رأسى مركب، يحتوى تتابع الطبقات المعروفة في ترتيب زمنى على أساس محتواها الحفرى، أو أى أدلة أخرى على العمر النسبى . وما زال يضاف إلى هذا

meso وسطى ويعنى مقطع zoe حياة) وحقب الحياة الحديثة Cenozoic Era (يعنى مقطع ceno حديث ويعنى مقطع zoe حياة). وتنعكس هذه الأسماء اختلافات واضحة في شكل الحياة على مستوى العالم عند الحدود بين الأحقاب. وينقسم كل حقب من الأحقاب الثلاثة إلى وحدات زمنية تسمى عصور periods. وينقسم حقب الحياة القديمة Paleozoic Era إلى ستة عصور، كما ينقسم حقب

جدول (2.9) مقياس الزمن الجيولوجي (تمثل الأعداد العمر بملايين السنين قبل الآن (م.س) وقد أضيفت تلك الأعمار بعد وضع مقياس الزمن الجيولوجي بوقت طويل اعتماداً على الطرق المطلقة)

دهر	حقب	عصر	حين	العمر (م.س.)	تطور النباتات والحيوانات
الحياة الظاهرة	الحياة الحديثة	الرابع	الهولوسين	0.01	ظهور الإنسان
			البليستوسين	1.8	
		الثالث	البليوسين	5.3	عصر الثدييات
			الميوسين	24	
			الاوليجوسين	37	
			الأيوسين	58	انقراض الديناصورات وكثير من الأنواع الأخرى
			الباليوسين	65	
	الحياة الوسطى	الطباشيري		135	ظهور النباتات الزهرية
		الجوراسي	عصر الزواحف	180	ظهور الطيور
		ال ترياسي		225	سيادة الديناصورات
الحياة القديمة	الحياة القديمة	البرمي	عصر البرمائيات	265	بداية الزواحف
		الكربوني		345	مستنقعات الفحم الضخمة انتشار البرمائيات
		الديفوني			بداية الحشرات
		عصر الأسماك		400	سيادة الأسماك
				430	بداية النباتات القارية
	البروتروزوي	السيلوري		500	بداية الأسماك
		الأوردوفيشي	عصر		سيادة ثلاثية الفصوص
		الكمبري	اللافقاريات	570	بداية الكائنات عديدة الخلايا
	الأركي	يطلق عليه ما قبل الكمبري ويشمل 87% من عمر الأرض		2500	بداية الكائنات وحيدة الخلايا
				3800	أقدم الصخور
المهاديان				4600	نشأة الأرض

فترة ما قبل الكمبرى Precambrian time

للأرواح الراحلة)، والأركي Archean (وتعنى كلمة archaiaos القديم أو السحيق)، والبروتيروزوى Proterozoic (وتعنى كلمة proteros قبل و zoe تعنى حياة). وكثيراً ما يطلق على هذه الفترة الزمنية الطويلة من عمر الأرض وبصورة غير رسمية مصطلح ما قبل الكمبرى Precambrian. وعلى الرغم من أنه يمثل نحو 87٪ من عمر الأرض، إلا أنه لا يقسم إلى أقسام كثيرة كتلك التى تكون فى دهر الحياة الظاهرة.

لا يمكن عمل تقسيم تفصيلي لمقياس الزمن الجيولوجي إلا في 570 مليون سنة الأخيرة من عمر الأرض، والتي تخفى على بقايا الحياة الهيكلية المعقدة، وتتمد من بداية العصر الكمبرى حتى الآن. وتقسم الأربعة بلايين سنة من عمر الأرض، والتي تسبق العصر الكمبرى إلى ثلاثة دهور وهى الهاديان Hadean (تعنى كلمة Haides عالم الأساطير الخفى

جدول (3.9): أصل أسماء وحدات دهر الحياة الظاهرة

حقب	عصر	حين	أصل الاسم
الحياة الحديثة Cenozoic	الرابع Quaternary	الحديث Holocene	يونانية بمعنى كامل الحداثة
	الثالث Tertiary	البليستوسين Pleistocene	يونانية بمعنى الأقصى حداثة
		البليوسين Pliocene	يونانية بمعنى الأكثر حداثة
		الميوسين Miocene	يونانية بمعنى الأقل حداثة
		الأوليغوسين Oligocene	يونانية بمعنى الحديث قليلا
		الأيوسين Eocene	يونانية بمعنى فجر الحديث
		الباليوسين Paleocene	يونانية بمعنى الفجر المبكر للحديث
الحياة الوسطى Mesozoic	الطباشيرى Cretaceous	يستخدم اسم الحين فقط من قبل المختصين.	مشتقة من اللفظ اللاتيني creta بمعنى طباشير حيث ظهرت جروف الطباشير في جنوب إنجلترا
	الجوراسى Jurassic		جبال جورا بين سويسرا وفرنسا
	الترياسى Triassic		أخذت من كلمة Trias بمعنى ثلاثى، حيث تنقسم صخور العصر في ألمانيا إلى ثلاثة أقسام
الحياة القديمة Paleozoic	البرمى Permian		منطقة بيرم في روسيا
	الكربونى Carboniferous		أخذت من كلمة charbon بمعنى فحم بالفرنسية، حيث توجد طبقات الفحم في صخور هذا العصر.
	الديفونى Devonian		اسم مقاطعة ديفونشاير في جنوب غرب إنجلترا
	السلورى Silurian		السليلور قبيلة قديمة كانت تسكن ويلز
	الأوردوفيشى Ordovician		الأوردوفيش قبيلة قديمة كانت تسكن ويلز
	الكمبرى Cambrian		كامبريا هو الاسم الرومانى القديم لمقاطعة ويلز

ب- مشكلات تحديد الأعمار في مقياس الزمن الجيولوجي
على الرغم من أنه أمكن التوصل إلى تقديرات دقيقة لأعمار مختلف أقسام العمود الجيولوجي، فإن هذا لا يعني أن الأمر يخلو من صعوبات. وتكمن الصعوبة الأولى في وضع تقدير دقيق للعمر في أنه لا يمكن تقدير عمر كل الصخور باستخدام الطرق الإشعاعية، وذلك يرجع إلى أنه لكي تكون عملية التقدير دقيقة، فلا بد أن تكون كل المعادن الموجودة في الصخر قد تكونت في وقت واحد. ولهذا السبب، فإننا نستخدم النظائر المشعة لتحديد متى تبلورت المعادن المكونة للصخر الناري، ومتى وصلت درجة الحرارة والضغط إلى الحد، الذي يساعد على تكوين معادن جديدة في الصخر المتحول.

أما الصخور الرسوبية فإنها نادراً ما يمكن تحديد عمرها باستخدام المواد المشعة مباشرة. وعلى الرغم من أن الصخور الرسوبية الفتاتية قد تحتوي على حبيبات بها نظائر مشعة، إلا أن عمر الصخر نفسه لا يمكن تحديده بطريقة دقيقة، لأن الحبيبات المكونة للصخر لا تنتمي إلى عمره نفسه، كما أن الرواسب تأتي من صخور مختلفة العمر بالتجوية. كما أن الأعمار المقدرة من الصخور المتحولة قد يصعب تفسيرها؛ لأن عمر معدن معين في الصخر المتحول لا يمثل بالضرورة عمر تكوين الصخر الأصلي، بل قد يمثل مرحلة من مراحل التحول اللاحقة. أما إذا كان الصخر الرسوبي لا يحتوي على مواد مشعة مناسبة لتقدير عمره المطلق، فإنه يتحتم على الجيولوجي ربط الطبقات الرسوبية بأجسام نارية يمكن تحديد أعمارها المطلقة، حيث تكون الطبقات الرسوبية أقدم عمراً من الجسم الناري القاطع له، كما تكون أحدث عمراً من الأجسام النارية غير المتأثرة بها في التتابع نفسه (شكل 14.9).

ومن مثل هذا النوع من الشواهد، يمكن للجيولوجي أن يقدر عمر الصخور الرسوبية تقديراً

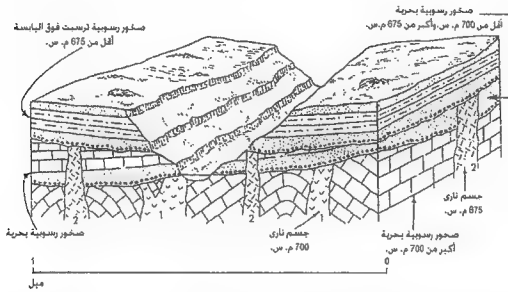
ويرجع السبب في عدم تقسيم الفترة الزمنية الطويلة التي يشملها ما قبل الكامبري إلى أحقاب وعصور وأحيان كثيرة إلى أننا لا نعرف كثيراً عن تاريخ ما قبل الكامبري. وتماثل كمية المعلومات التي توصل إليها الجيولوجيون عن ماضي الأرض ما عرفوه عن تاريخ البشر. وكلما تعمقنا أكثر في الماضي قلت المعلومات التي نستطيع الإلمام بها. وبالمطالع سجلات أحداث القرن التاسع عشر بشكل أفضل من أحداث القرن الأول الميلادي، وهكذا. وهذا ينسحب بالطبع على تاريخ الأرض، إذ كلما قدم الحدث كان أكثر تشوشاً وأقل وضوحاً. وهناك أسباب أخرى لتفسير نقص معلوماتنا عن تلك الفترة الزمنية من تاريخ الأرض والتي يشملها "ما قبل الكامبري"، منها:

1- لم يبدأ الانتشار الواسع للحياة في السجل الجيولوجي إلا من بداية العصر الكامبري. أما ما قبل الكامبري فقد انتشرت أشكال بسيطة من الأحياء مثل: البكتريا والطحالب والفطريات والديدان، وهي أشكال من الأحياء لا تحتوي على هيكل صلب، والذي يمثل أحد المتطلبات الأساسية لحفظ الكائنات الحية كحفريات. ولهذا السبب فإن السجل الحفري في ما قبل الكامبري يعدّ هزيلًا.

2- ولأن صخور ما قبل الكامبري شديدة القدم فقد تعرض معظمها لتغيرات كثيرة وشديدة. حيث يتكون معظم السجل الصخري في ما قبل الكامبري من صخور متحولة مشوهة بشدة. مما يجعل البيئة القديمة شديد الصعوبة نظراً لتشوه كل الشواهد التي كانت تميز الصخور الرسوبية.

وقد أمدتنا المواد المشعة بحل جزئي لمشكلة تحديد أعمار ومضاهاة صخور ما قبل الكامبري، إلا أن عدم حل تعقيدات ما قبل الكامبري يظل أمراً مثبطاً لهمهم.

مطلقاً. كما يتضح مدى أهمية الربط بين الدرامات العملية والمشاهدات الحقلية عند القيام بهذه المهمة. وقد قام الجيولوجيون في مختلف أنحاء العالم منذ نهاية القرن التاسع عشر، وخلال القرن العشرين،



شكل (14.9): تقدير العمر المطلق للصخور الرسوبية بتقدير عمر الصخور النارية المصاحبة لها.

'After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

V. التصنيف الطبقي (الاستراتيجي)

تضم الوحدات الطبقة (الاستراتيجية) stratigraphic units مجموعة الطبقات التي يمكن تقسيمها بناءً على خصائصها الطبيعية أو الكيميائية أو محتواها من الحفريات. كما تشمل تلك الوحدات أيضاً وحدات زمنية time units يتم وضعها بناءً على أعمار هذه الطبقات. ولقد تنبه العلماء في أواخر القرن التاسع عشر إلى أهمية فصل مفهوم الزمن الجيولوجي وتقسيماته عن أقسام الصخور، التي ترسبت خلال هذا الزمن. ولقد أدى هذا الفصل إلى نشأة وحدات الزمن الجيولوجي geologic time units والتي تشمل مختلف عصور periods الزمن الجيولوجي، وأيضاً الوحدات الزمنية الصخرية time-rock units والتي تشمل أنظمة systems الصخور التي تكونت خلال هذه العصور (جدول 4.9).

بمعل شبكات من المضاهاة الاستراتيجي وعمل تدقيق لمقياس الزمن الجيولوجي، إلا أنهم استخدموا مصطلحات ومفاهيم مختلفة مما أدى إلى حدوث كثير من اللبس. وللحضاء على هذا اللبس ولوضع قواعد ثابتة لتسمية الوحدات الطبقة الرسمية، عقد عديد من المؤتمرات العملية المحلية والدولية. وفي إطار هذا الاهتمام وبالتعاون بين جمعية أمريكا الشمالية للتسمية الطبقة North American Commission on Stratigraphic Nomenclature والجمعية الأمريكية للجيولوجيين العاملين في البترول American Association of Petroleum Geologists تم نشر عدد من طبعات "دليل التسمية الطبقة Code of Stratigraphic Nomenclature". وقد وضع هذا الدليل (الكود) في الأساس ليضع قواعد تسمية الوحدات الاستراتيجية الرسمية المختلفة، مما يعمل على سهولة

جدول (4.9). تصنيف الوحدات الطبقيّة متبوعة بالوحدة الأساسية ، كما نشرت في دليل (كود) التسمية الطبقيّة لشمال أمريكا عام 1986 م.

الوحدة الأساسية	نوع الوحدة	
Formation	Lithostratigraphic	I. وحدات مادية
Lithodemic	Lithodemic	أ. وحدات طبقيّة صخرية
Polarity zone	Magnetopolarity	ب. وحدات صخرية لأطباقية
Biozone	Biostratigraphic	ج. قطبيّة مغناطيسية
Geosol	Pedostratigraphic	د. وحدات طبقيّة حيوية
	Time units	هـ. وحدة تربة صخرية
		II. وحدات متصلة بالزمن الجيولوجي
Period	Geochronologic	1. وحدات الزمن الجيولوجي
Polarity Chron	Polarity-Chronologic	2. قطبيّة - زمنيّة
		ب. وحدات مادية ترسبت خلال فترة زمنيّة محددة
System	Chronostratigraphic	1. وحدات طبقيّة زمنيّة
		2. قطبيّة زمنيّة طباقية
Polarity chronozone	Polarity- chronostratigraphic	

فتشمل الصخور التي ترسبت خلال الفترة الزمنية المساوية لوحدة الزمن الجيولوجي المقابلة لها. وهي تشمل وحدة صخور الدهر eonothem وتقابل الدهر، والتجمع أو صخور الحقب erathem ويقابل الحقب، والنظام system ويقابل العصر، والنسق series ويقابل الحين، والمرحلة stage وتقابل العمر، (جدول 5.9). وتأخذ كل وحدتين متقابلتين من الوحدات السابقة اسماً واحداً؛ فمصطلح الكامبري Cambrian يطلق على العصر الكامبري Cambrian Period والذي يشمل الفترة الزمنية الممتدة بين نحو 570 إلى 500 مليون سنة مضت، بينما يشير مصطلح نظام الكامبري Cambrian system إلى كل الصخور التي ترسبت خلال تلك الفترة الزمنية.

أما الوحدات الطبقيّة الصخرية، أو باختصار الوحدات الصخرية rock units، فتعبر عن تقسيم التتابع الطبقي بناءً على صفاته الصخرية، بصرف النظر عن زمن تكوين هذه الصخور أو طريقة تكوينها.

التواصل بين الجيولوجيين. ويشمل هذا الدليل خمسة أنواع من الوحدات، وهي: وحدات الزمن الجيولوجي geochronologic units أو time units والوحدات الطبقيّة الزمنية chronostratigraphic units أو time rock units والوحدات الطبقيّة الصخرية lithostratigraphic units أو rock units والوحدات الطبقيّة الحيوية biostratigraphic units ووحدات القطبيّة المغناطيسية الطبقيّة polarity units أو time - rock chronostratigraphic units. polarity

ويقسم الزمن الجيولوجي إلى وحدات غير متساوية بناءً على طول الأحداث الجيولوجية المختلفة، وتشمل وحدات الزمن الجيولوجي time units: الدهر: eon والحقب era والعصر period والحين epoch والعمر age، مرتبة من الأطول إلى الأقصر. ويعتبر العصر period الوحدة الزمنية الأساسية. أما الوحدات الطبقيّة الزمنية time - rock units

جدول (5.9): مقارنة المصطلحات المستخدمة لوحدة الزمن الجيولوجي والوحدات الطبقة الزمنية

وحدات زمنية	وحدات طبقية زمنية
Eonothem صخور الدهر	Eon الدهر
Erathem صخور الحقبة	Era حقبة
System نظام	Period عصر
Series نسق	Epoch حين
Stage مرحلة	Age عمر

أما الوحدات الطبقة الحيوية فتقوم على أساس تقسيم التباينات الطبقة على أساس محتواها من الحفريات ، والوحدة الأساسية للوحدات الحيوية هي النطاق الحيوي biozone وهي طبقة أو مجموعة من الطبقات ، تتميز بوجود نوع معين وحيد أو مجموعة مميزة من الحفريات ، بغض النظر عن حدود النوع الصخرية الحاوية لها أو العمر. وقد تتطابق حدود النوع الحيوي مع حدود الوحدات الطبقة الأخرى وقد لا تتطابق ، وإذا دلت الحفرة أو مجموعة الحفريات الدالة index fossils على زمن معين، سمي النطاق بالنطاق الزمني chronozone. ويختلف نوع النطاق بناءً على اختلاف درجة الدلالة الزمنية لمجموعة الحفريات المميزة للنطاق، فمنها نطاق المدى range zone ، الذي يتحدد من بداية ظهور حتى اختفاء عنصر حفري واحد يميزه، ومنها نطاق المجموعة assemblage zone الذي يتحدد من بداية ظهور عنصرين حفريين أو أكثر حتى اختفائها. كما قد يكون نطاق وفرة acme zone وهو نطاق يتحدد من بداية انتشار ووفرة مجموعة حفرية معينة حتى تناقصها. ويسمى النطاق باسم المجموعة الحفرية الدالة عليه.

أما وحدات القطبية المغناطيسية الطبقة polarity time- rock units (magnetostatigraphic units) فهي وحدات حديثة نسبياً، وتقوم على بصمات المغناطيسية القديمة paleomagnetism المتبقية في

وتشمل الوحدات الصخرية فوق المجموعة supergroup والمجموعة group والتكوّن formation والمعضر member والطبقة bed . والوحدة الرئيسية في هذا التصنيف هي التكوّن formation. ويضم التكوّن مجموعة من الطبقات التي لها نفس الخصائص الصخرية ، وتحتوي عادة على نفس المجموعة من الحفريات . وقد تتكون بعض التكوّنات من نوع صخري واحد مثل الحجر الجيري ، بينما تتكون مكونات أخرى من طبقات رقيقة متبادلة من أنواع مختلفة من الصخور مثل الحجر الرملي والطفلي . وعلى الرغم من هذا الاختلاف، فإن كل متكوّن يحتوي على مجموعة من الطبقات الصخرية التي يمكن تتبعها على الخرائط الجيولوجية ذات مقياس الرسم المناسب (في حدود 1:25000). ويسمى التكوّن باسم بعض المعالم الجغرافية المحلية مثل الأنهار أو المدن أو غيرها ، مثل متكوّن وادي التطرون Wadi Natrun Formation أو اسم صخر معين مثل طفيل إسنا Esna Shale Formation. كما يجب أن يختار للمتكوّن منطقة مرجعية يوجد بها التكوّن بشكل كامل. وعند كتابة المصطلح باللغة الإنجليزية تكتب الحروف الأولى كبيرة. ويجب اتباع النظام نفسه عند تسمية بقية الوحدات الصخرية مثل فوق المجموعة أو المجموعة أو العضو.

الأخيرة، ومع وجود أجهزة قياس المغناطيسية (مجنتومترات) على درجة عالية من الدقة والحساسية، يمكن تحديد أحداث المغناطيسية القديمة لكثير من التتابعات الطبقة في قيعان المحيطات، ومعايرة هذه الأحداث بتقديرات الأعمار المطلقة باستخدام المواد المشعة؛ حيث يمكن تحديد عمر الصخور التي لا تحتوي على حفريات مرشدة.

الملخص

1. علم طبقات الأرض (الاستراتجرافيا) هو دراسة الطبقات الصخرية، ليس فقط من ناحية تتابعها وترتيبها وعمرها، بل من ناحية شكلها وتوزيعها وتركيبها الصخري، ومحتواها الحفري، بالإضافة إلى خصائصها الكيميائية والفيزيائية.
2. يستخدم الجيولوجيون لتفسير تاريخ الأرض نوعين من تقدير الزمن، هما: العمر النسبي والعمر المطلق. وفي العمر النسبي يتم ترتيب الأحداث الجيولوجية حسب تاريخ وقوعها من الأقدم إلى الأحدث. أما العمر المطلق فيعبر عن تقدير لعدد السنين، التي انقضت منذ وقوع الحدث الجيولوجي.
3. يتم تقدير العمر النسبي بناءً على عدد من القوانين أو القواعد: وهي أن معظم الطبقات قد ترسبت أفقياً (قاعدة الأفقية الأصلية)، كما تجتمعت كل الطبقات في تتابع تكون الطبقات الأقدم لأسفل والأحدث لأعلى (قاعدة تتابع الطبقات). ويتم ترسب الطبقات في طبقات متصلة عبر حوض رسوبي حيث يمكن مقارنتها ومضاهاها في مسافة (قاعدة الاستمرارية الجانبية الأصلية). كما أن أي شيء يقطع طبقة من الصخور الرسوبية أو أي نوع من الصخور يكون أحدث عمراً من

الصخور، والتي تقاس بهدف تحديد شدة واتجاه مجال الأرض المغناطيسي في الأزمنة الجيولوجية الماضية؛ حيث تشبه المغناطيسية المتحجرة في الصخور والتي يعبر عنها بنطاق قطبية polarity zone الحفريات المحتواة في الطبقات، وللبلصمة المغناطيسية أهمية زمنية يعبر عنها كنطاق قطبية زمنية polarity chronozone. وهذه الأهمية الزمنية لأحداث المغناطيسية القديمة وفترات القطبية تمكنا من بناء مقياس زمني بناءً على القطبية القديمة، والذي يظهر اتجاه القطبية القديمة المحفوظة في نوعيات مختلفة من الصخور، مثل: انسيابات اللابة القارية وبازلت قاع المحيط ورواسب البحار العميقة. وتساعد المواد المشعة في تحديد العمر المطلق لأحداث المغناطيسية القديمة، والتي يطلق عليها وحدات قطبية زمنية polarity chronologic units. وفي الرواسب البحرية العميقة يمكن تحديد العمر الدقيق لوحداث القطبية من ربطها بالنطاقات الحيوية.

وبالتالي، فإن المغناطيسية القديمة خاصة في الصخور تظهر تتابعاً زمنياً، ويمكن استخدامها في عمل مضاهاة زمنية بين التتابعات الطبقة. فإذا أمكن تعرف أحداث مغناطيسية قديمة وكان من الممكن ربطها بوسائل أخرى للمضاهاة، أصبحت لدينا وسيلة جيدة لمضاهاة الرواسب البحرية العميقة على مستوى عالمي (شكل 9.9). وقد ثبت أن المغناطيسية القديمة طريقة ممتازة لعمل تقسيم طبقي زمني لصخور حقبة الحياة الحديثة والنصف العلوي من حقبة الحياة الوسطى، إلا أن تطبيقه على الصخور الأقدم من ذلك تفقر لوجود قطاعات مرجعية جيدة على مستوى الكرة الأرضية ككل. بمعنى آخر، فإن المقياس الزمني للمغناطيسية القديمة يطبق فقط على الصخور التي ترسبت فقط على قيعان المحيطات الحديثة. وفي الآونة

نصف وزن المادة المشعة إلى نظيرها غير المشع،
وهي مميزة لكل عنصر على حدة.

8. هناك أربع طرق لقياس عمر الصخور النارية
والتحول القديمة وهي طريقة: اليورانيوم-
238 / رصاص-206، واليورانيوم-235/
رصاص-207، والبوتاسيوم-40 / أرجون-
40 والروبيديوم-87 / استرانسيوم-87. أما
المواد المشعة قصيرة العمر والتي تستخدم في تحديد
عمر أحداث جيولوجية حديثة، فتشمل: الكربون
-14 والثوريوم-230، والبروتكتينيوم-231.

9. يقسم مقياس الزمن الجيولوجي (العمود
الجيولوجي) تاريخ الأرض إلى أقسام غير متساوية
يطلق على كل منها مصطلح دهر وهي الهاديان
والأركي والبروتروزوي التي يشملها جميعا
مصطلح ما قبل الكمبري، ثم الفانبروزوي أو
دهر الحياة الظاهرة، والذي بدأ قبل 570 مليون
سنة. وينقسم دهر الحياة الظاهرة إلى ثلاث أحقاب
وهي حقبة: الحياة القديمة، والوسطى، والحديثة.

10. يتم تحديد معظم الأعمار المطلقة للصخور
الرسوبية وما تحتويه من حفريات بطريقة غير
مباشرة عن طريق تحديد عمر الصخور النارية أو
التحول المصاحبة.

11. وضع دليل التسمية الطبقيّة القواعد الأساسية
للتصنيف الطبقي وتسمية الوحدات الطبقيّة
المختلفة. وهذه الوحدات خمسة أنواع، هي:
وحدات الزمن الجيولوجي، والوحدات الطبقيّة
الزمنية، والوحدات الطبقيّة الصخرية،
والوحدات الطبقيّة الحيوية، ووحدات القطبيّة
المغناطيسية الطبقيّة.

الطبقة الرسوبية أو تلك الصخور (قاعدة علاقات
القطع المستعرض). ويعتبر الفئات والحبيبات التي
توجد في صخر أقدم عمرا من الصخر نفسه
(قاعدة المكتشفات). وتستخدم الحفريات في تحديد
أعمار الطبقات والمضاهاة (قاعدة التتابع الحفري)
. وتستخدم البصمات المغناطيسية القديمة، والتي
تحدث نتيجة انقلاب القطبية للمجال المغناطيسي
عبر الزمان، في تقسيم التتابعات الطبقيّة
والمضاهاة بينها.

4. تمثل علاقات عدم التوافق عبارة عن فواصل
طبيعية في التتابعات الطبقيّة، فترة زمنية توقف فيها
الترسيب، أو أزيلت التعرية جزءا من الطبقات
التي سبق ترسيبها. وينتج عدم التوافق الزاوي من
تأثر مجموعة طبقات بنشاط تكتوني بعد تكوّنها
وقبل ترسيب مجموعة طبقات جديدة.

5. تقوم عملية مضاهاة الطبقات بين موضع وآخر
على مجموعة الصفات الفيزيائية والبيولوجية
المميزة للفترة الزمنية المحددة. وتكون المضاهاة
أكثر مصداقية كلما زادت مجموعة الصفات
المستخدمة في إجراء المضاهاة.

6. يقدر العمر المطلق باستخدام ظاهرة الإشعاع،
وهي قدرة نويات الذرات غير الثابتة على التحلل
التلقائي بإطلاق جسيمات ألفا أو بيتا أو بكتساب
إلكترون. وللنصر المشع فظائر تنفص في عدد
البروتونات وتختلف في عدد النيوترونات
الموجودة في نوياتها، ولذلك فهي تنفص في العدد
الذري وتختلف في رقم الكتلة.

7. يتحدد عمر العينة من معرفة عمر النصف للنصر
المشع، وقياس نسبة الولود/ الوليد. وعمر النصف
half life وهو الفترة الزمنية اللازمة لتحلل

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

<http://members.aol.com/fostrak/paleotime.htm>
<http://www.talkorigins.org/>
<http://www2.wadgin.ac.nz/c14/ncbio/index.html>
<http://members.aol.com/fostrak/paleoduc.htm>
http://www.usgs.utep.edu/dinos/dinos_home.html

المصطلحات المهمة

absolute time	عمر مطلق	isotope	نظير
ages	أعمار	Mesozoic Era	حقب الحياة المتوسطة
amino acids dating	تحديد العمر باستخدام الأحماض الأمينية	nonconformity	عدم توافق تبايني
angular unconformity	عدم التوافق الزاوي	original horizontality, principle of	الأفقية الأصلية ، قاعدة
Archean Eon	دهر الأركي	original lateral continuity, principle of	الاستمرارية الجانبية الأصلية ، قاعدة
Cenozoic Era	حقب الحياة الحديثة	paleomagnetism	المغناطيسية الأرضية القديمة
correlation	مضاهاة	Paleozoic Era	حقب الحياة القديمة
cross-cutting relationship	علاقة القطع المستعرض	paraconformity	شبه التوافق
principle of	قاعدة	parent	الولود
daughter	وليد	period	عصر
disconformity	شبه توافق	Phanerozoic Eon	دهر الحياة الظاهرة
eon	دهر	Proterozoic Eon	دهر البروتروزوي
epoch	حين	radioactive decay	اضمحلال إشعاعي
era	حقب	radioactive emission	انبعاث إشعاعي
fission track dating	تحديد العمر باستخدام مسارات الانشطار	radioactivity	الإشعاع الذري
formation	متكون	radiocarbon dating	تحديد العمر باستخدام الكربون المشع
fossil	حفريّة	relative time	العمر النسبي
fossil succession, principle of	التتابع الحفري ، قاعدة	stratigraphic sequences	تتابعات طبقية
geologic column	عمود جيولوجي	stratigraphic superposition, principle of	تتابع الطبقات ، قاعدة
geologic time scale	مقياس الزمن الجيولوجي	stratigraphy	علم الطبقات
Hadean Eon	دهر الهاديان	time- rock units	وحدات زمنية صخرية
half-life	عمر النصف	unconformity	عدم توافق
hiatus	ثغرة ترسب (ثلمة)		
inclusions, principle of	المكتنفات ، قاعدة		
index fossil	حفريّة دالة		

الأسئلة

1. اذكر أنواع المضاهاة التى يمكن للجيولوجى أن يقوم بها.
2. ما الفرق بين العمر النسبى والعمر المطلق؟
3. اذكر أنواع عدم التوافق ، موضعا إيجابتك بالرسم.
4. ما القسم من العمود الجيولوجى الذى يستخدم طريقة الكربون المشع فى تقدير عمر أحداثه؟
5. ما الشواهد التى تستخدم فى التفريق بين السطح العلوى والسفلى للطبقات؟
6. ناقش ثلاثاً من القواعد التى تستخدم فى تقدير العمر النسبى.
7. ما أنواع الصخور التى يستخدم الاسترانسيوم فى تقدير أعمارها؟
8. ناقش الأساس العلمى الذى قامت عليه طريقة تحديد العمر باستخدام الأحماض الأمينية.
9. ناقش الوحدات الطبقيّة التى يشملها العمود الجيولوجى.

الفصل

10

تشوه الصخور : الطيات والصدوع وتراكيب أخرى كسجل لتشوه الصخور

أ. كيف تشوه الصخور ؟ :

أ. الإجهاد والانفعال

ب. مراحل التشوه :

1. التشوه المرن

2. التشوه اللدن

3. التكسر

ج. المواد اللدنة والمواد القصفة (سريعة الكسر) :

1. الحرارة

2. الإجهاد الحائس

3. الزمن والانفعال

4. التركيب

د. صفات التقصف واللدونة في الغلاف الصخري

II. تفسير نتائج الحقل :

أ. قياس المضرب والميل

ب. عمل خريطة جيولوجية وقطاع عرضي

III. التشوه بالثني : طي الصخور :

أ. أنواع الطيات

ب. الاستنتاجات من طي الصخور

IV. التشوه بالكسر : الفواصل والصدوع :

أ. الفواصل

ب. الصدوع :

1. تصنيف الصدوع

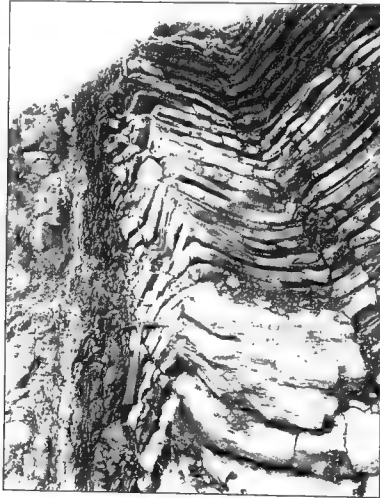
2. الأدلة على حدوث الحركة على امتداد الصدوع

3. العلاقة بين الطيات والصدوع

V. تفسير التاريخ الجيولوجي

مندهشين أيضا من القوى التي سببت تشوه هذه الصخور الصلدة بتلك الطريقة . فهل يمكن إعادة بناء التاريخ الجيولوجي في منطقة ما من أنماط تشوه الصخور التي نراها في الحقل؟ وكيف تتشوه أنواع الصخور المختلفة ، وما العلاقة بين التشوه وتكتونية الألواح؟ ، حيث أثبتت المشاهدات الحقلية أن أنماط تشوه الصخور متشابهة في جميع أنحاء الأرض .

توصل علماء القرنين الثامن عشر والتاسع عشر ، والذين أرسوا دعائم علم الجيولوجيا بمفهومي الحديث، إلى أن معظم الصخور الرسوبية قد ترسبت أصلا كطبقات أفقية لينة فوق قاع البحر ثم تصلدت مع الزمن . ولكن كان العلماء مندهشين من وجود كثير من الطبقات المائلة والمطوية أو المتصدعة ، كما كانوا



شكل (1.10): مثال لتشوه الصخور rock deformation.

متكشف لصخور ترسبت كطبقات رسوبية أفقية من الحجر الجيري والنشتر (مجموعة الحواصة) ، ثم تعرضت للطي والتصدع نتيجة لقوى تكتونية أثرت على المنطقة . لاحظ وجود صدع (يسار الصورة) يفصل الصخور الرسوبية عن الصخور البركانية ، جبال عمان ، الإمارات العربية المتحدة . (د. علي فراج عثمان ، قسم الجيولوجيا - جامعة عين شمس) .

وتأتى معرفتنا بالعوامل التى تتحكم فى تشوه الصخور من التجارب العملية، عندما نقوم بضغط أولي أو شد أسطوانات أو مكعبات من الصخور تحت ظروف متحكم فيها، ومتابعة ما يحدث فى هذه الحالات .

أ. الإجهاد والانفعال

يفضل الجيولوجيون استخدام مصطلح **إجهاد stress** بدلاً من مصطلح ضغط **pressure** عند مناقشة تشوه الصخور. ويصف مصطلح **إجهاد حابس confining stress** الوضع عندما يكون الإجهاد متساوياً فى كل الاتجاهات، مثل: الضغط على جسم صغير مغمر فى سائل أو غاز، أو الضغط الذى يشعر به الشخص فوق كل جسمه عندما يغوص بعمق تحت سطح الماء. وعلى العكس من ذلك، فإن الإجهاد التفاضلى **differential stress** والذى يكون غير متساوٍ فى كل الاتجاهات، هو الذى يسبب تشوه الصخور. وللإجهاد التفاضلى ثلاثة أنواع، هى: إجهاد الشد **tensional stress** وهو الذى يعمل على شد الصخور، وبالتالى جذب مكونات الصخر بعيداً عن بعضها البعض (شكل 2.10)، وإجهاد تضاضغى **compressive stress** (شكل 2.10 ب) وهو إجهاد يدفع بمكونات الصخور نحو بعضها البعض، بينما يعمل إجهاد القص (البر) **shear stress** على دفع كل جانبيين متقابلين من الجسم ليسا على خط واحد ولكنها فى المستوى نفسه فى اتجاهين متعاكسين. ولتخيل إجهاد القص، فإننا إذا أمسكنا بمجموعة من الأوراق مثل أوراق اللعب "الكوتشينه" بين راحتيينا، ثم حركنا أيدينا موازيين لبعضهما البعض، ولكن فى اتجاهين متعاكسين، فإن الأوراق تنزلق فوق بعضها البعض، مما يؤدي إلى تشوه الشكل (شكل 3.10).

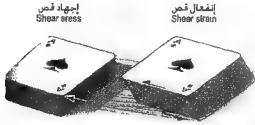
وتتولد القوى نفسها فى الأنواع الثلاثة من الحدود بين الألواح؛ إجهادات التضاضغ تسود عند الحدود

وللإجابة عن التساؤلات السابقة، فإن هناك بعض الأسس والمفاهيم التى تفسر طرق تشوه الصخور. ويعرف العلم الذى يهتم بدراسة تراكيب القشرة الأرضية وشكلها وتوزيعها، والعوامل التى مسببتها بالجيولوجيا التركيبية **structural geology**. وهذا الفرع من علوم الجيولوجيا قريب من علم الجيولوجيا البنائية (البنائيات) **tectonics**، الذى يتم بدراسة المعالم التركيبية الكبرى للجزء الخارجى من الأرض وأسبابها؛ أى التراكيب الأكثر اتساعاً وامتداداً من تلك التى يتعامل معها فرع الجيولوجيا التركيبية.

وتعتبر عمليات الطى **folding** والتصدع **faulting** من أكثر أشكال التشوه شيوعاً فى الصخور الرسوبية والمتحولة والنارية، وهى الصخور المكونة للقشرة الأرضية، ولكنها تكون أوضح ما يمكن فى الصخور الطبقية (سواء كانت رسوبية أو بركانية) والصخور المتحولة عنها (شكل 1.10). وتشبه الصخور عندما تطوى قطعة قماش، وعندما تضغط من طرفيها، حيث تتحدب لأعلى على هيئة طيات **folds**. أما الصدوع **faults** فإنها تنشأ عن قوى تكتونية تؤدي إلى كسر الجسم الصخرى وانزلاق أحد جانبيه بالنسبة للآخر فى حركة موازية لسطح الكسر. وتتراوح أبعاد الطيات والصدوع بين عدة سنتيمترات وعشرات الكيلومترات. ويتكون عديد من سلاسل الجبال من سلاسل متصلة من الطيات الكبيرة أو الصدوع أو كليهما، والتى تسمى تجويفاتها وتعربتها. ويعتقد الجيولوجيون الآن أن القوى التى تحرك ألواح القشرة الأرضية الكبيرة هى المسئولة أساساً عن التشوهات الموجودة فى معظم المناطق، حتى المحلية منها.

أ. كيف تشوه الصخور؟

لكى نناقش تشوه الصخور، فإنه من المفيد أن نستعرض بعض الخصائص الأولية للمواد الصلبة.



شكل (3.10): إجهاد القص shear stress. عندما نحرك أوراق اللب (الكوتشينة) في اتجاهين متعاكسين متوازيين ، تنزلق الأوراق فوق بعضها البعض .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

ب. مراحل التشوه

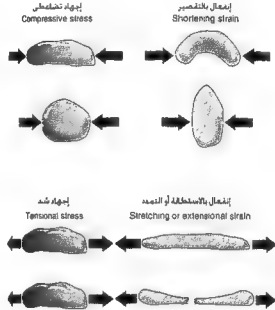
عندما يتعرض صخر لإجهاد متزايد ، فإنه يمر بثلاث مراحل من التشوه على الترتيب كالآتي :

1. التشوه المرن

يعرف التشوه المرن **elastic deformation** بأنه تغير معكوس أو غير دائم في حجم أو شكل الصخر الذي يتعرض للإجهاد . وعندما يزول الإجهاد ، فإن الصخر يعود إلى حجمه وشكله الأصلي . ويمكن لمادة ما أن تتحمل أى جهد حتى حد معين ، يسمى حد المرونة **elastic limit** ، وهو الحد الأقصى للإجهاد الذي يتعرض بعده الجسم الصلب للتشوه الدائم ولا يعود إلى حجمه أو شكله الأصلي مرة ثانية عندما يزول الإجهاد .

وقد كان العالم البريطاني الشهير سير روبرت هوك (1635-1703م) Sir Robert Hooke أول من أوضح أن العلاقة بين الإجهاد والانفعال لكل المواد تكون دائماً عبارة عن خط مستقيم ، بافتراض عدم تجاوز حد المرونة . ولقد أثبت هوك هذه العلاقة باستخدام زنبرك ، كما هو موضح في شكل (4.10). وجدير بالذكر أن قانون هوك صحيح أيضاً عند تطبيقه

المقاربة عندما تصادم الألواح ، وتسود إجهادات الشد عند الحدود المتباعدة عندما تتحرك الألواح بعيداً عن بعضها البعض ، وتسود إجهادات القص عند الصدوع الناقلة عند حدود الألواح عندما تنزلق الألواح أفقياً بمحاذاة بعضها البعض .



شكل (2.10): تأثير إجهادات الشد والانضغاط

(أ) إجهاد الشد **tensional stress** يعمل على تمديد الجسم واستطالته في اتجاه مواز لاتجاه الشد أو الكسر إذا استمر الشد .

(ب) يؤدي إجهاد التضغط **compressional stress** إلى طي الكرة أو استطالتها في اتجاه عمودي على الضغط .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

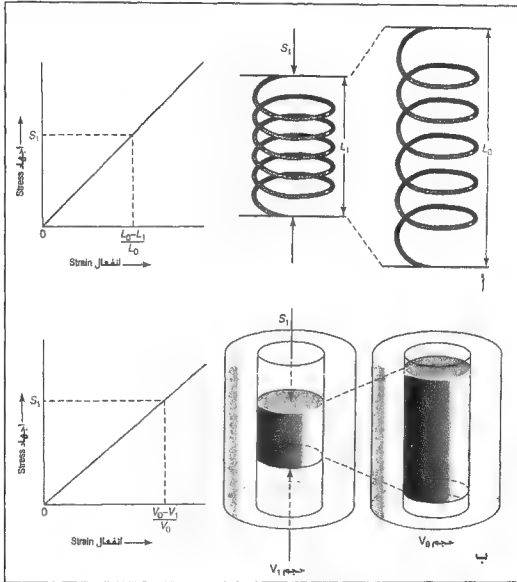
ويستخدم مصطلح انفعال لوصف تشوه الصخور نتيجة للإجهاد . ويمكن تعريف الانفعال **strain** بأنه تغير في حجم أو شكل جسم صلب أو في كليهما معا نتيجة للإجهاد . ويسبب الإجهاد الحابس تغييراً في حجم الجسم الصلب ، بينما يبقى الشكل ثابتاً . أما الإجهاد التفاضلي فإنه يؤدي إلى تغيير شكل الجسم الصلب ، وقد يسبب أو لا يسبب تغييراً في الحجم .

على الصخور (شكل 4.10 ب)، والذي يوضح أن الانفعال يتناسب طرديًا مع الإجهاد.

2. التشوه اللدن

يعرف التشوه اللدن **ductile deformation**

بأنه تغيير دائم في الشكل أو في الحجم أو في كليهما في صخر تعرض لإجهاد تعدى حد المرونة. فإذا تعرضت

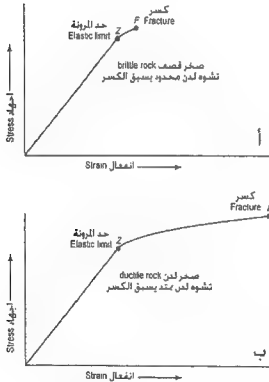


شكل (4.10): ينص قانون هوك على أن الانفعال يتناسب طرديًا مع الإجهاد في المواد المرنة.

- (أ) يقل طول الزنبرك نتيجة للإجهاد التضاعطي S₁، من L₀ إلى L₁. وتمثل العلاقة بين الإجهاد والانفعال بخط مستقيم
- (ب) يقل طول الأسطوانة الصخرية نتيجة لإجهاد تضاعطي S₁، ويقل حجم الأسطوانة من V₀ إلى V₁، وتمثل العلاقة بين الإجهاد والانفعال بخط مستقيم.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

ولكن إذا أسقطنا قطعة من الزبد على الأرض فإنها سوف تشوه دون أن تتكسر. فالزجاج إذاً مادة قصفة بينما الزبد مادة لدنة. ويوضح شكل (6.10 أ) منحنى إجهاد/ انفعال نموذجياً لمادة قصفة. ويلاحظ أن النقطة Z التي هي حد المرونة تكون قريبة جداً من النقطة F وهي نقطة التكسر point of fracture. لذلك، فإنه يحدث تشوه لدن قليل جداً في المادة القصفة قبل التكسر. وعلى العكس، فإن حد المرونة يكون بعيداً عن نقطة التكسر في المواد اللدنة (شكل 6.10 ب). ويوضح شكل (1.10) أمثلة لتشوه صخور قصفة وأخرى لدنة. فالطبقات في شكل (1.10) قد لويت بشدة وانحنت نتيجة التشوه اللدن، كما أن بعض الطبقات قد تشوهت بالتكسر.



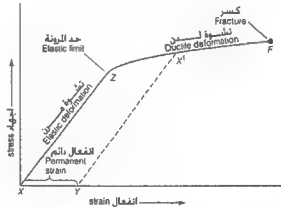
شكل (6.10): مقارنة منحنيات الإجهاد- الانفعال للمواد القصفة واللدنة.

(أ) منحنى المواد القصفة، (ب) منحنى المواد اللدنة.
(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

الإجهاد عند نقطة X^1 ، فإن الأسطوانة تعود جزئياً إلى شكلها الأصلي، ويتناقص الانفعال على امتداد المنحنى YX^1 ، ويحدث انفعال دائم للصخر يساوي XY . ويرجع الانفعال الدائم XY إلى التشوه اللدن للأسطوانة.

3. التكسر

يحدث التكسر fracture في الجسم الصلب عندما يتجاوز الإجهاد حدود كل من التشوه المرن واللدن. فإذا أخذنا في الاعتبار منحنى الإجهاد/ الانفعال مرة أخرى في شكل (5.10)، وإذا استمرت زيادة الإجهاد بدلاً من إزالته عند نقطة X^1 ، فإن منحنى الإجهاد/ الانفعال سوف يستمر في التزايد حتى نقطة F، حيث تنكسر الأسطوانة. ومن الواضح أن التكسر هو نوع من التشوه الدائم غير المعكوس.



شكل (5.10): منحنى الإجهاد- الانفعال لأسطوانة صخرية تم إجراء التجربة عليها في المعمل.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

جد. المواد اللدنة والمواد القصفة (سرعة الكسر)

تصنف المواد عموماً إلى قصفة ولدنة. وتميل المواد القصفة brittle substances (سرعة التكسر) إلى التشوه بتكوين كسور، بينما تشوه المواد اللدنة ductile substances بتغيير شكلها. فإذا أسقطنا قطعة من الزجاج على الأرض فإنها سوف تنكسر،

صلبة للإجهاد ، فإن هذا الإجهاد ينتقل عبر كل الذرات المكوّنة للمادة الصلبة ، وعندما يزيد الإجهاد عن قوة الروابط بين الذرات ، فإن الذرات إما أن تنتقل إلى مكان آخر داخل البناء البلوري لكي تخفف من الإجهاد ، وإما تنكسر الروابط ، مما يعنى حدوث كسر . وحيث إن الذرات لا تستطيع الانتقال بسرعة في المواد الصلبة ، فإذا كان الإجهاد بطيئاً وتدرجياً ، واستمر لفترة زمنية طويلة ، فإن الوقت يكون كافياً لتحرك الذرات ؛ حيث تستطيع المادة الصلبة أن تغير من شكلها ويحدث ما يعرف بالتشوه اللدن .

4. التركيب

لتركيب الصخر تأثير كبير على خصائصه ، حيث تؤثر بعض أنواع المعادن بقوة على صفات الصخر . فبعض المعادن مثل الكوارتز والجارنيت والأوليفين تكون شديدة التقصف ، بينما يكون البعض الآخر مثل: الميكا والصلصال والكالسيت والجبس لدناً . ومن جهة أخرى ، فإن الماء الموجود في الصخر يقلل من صفات التقصف ، بينما يزيد من صفات اللدونة في الصخر ، حيث يضعف الماء الروابط الكيميائية في المعادن ، كما يكوّن الماء طبقة رقيقة جداً حول حبيبات المعدن ، تقلل من الاحتكاك بين الحبيبات . ولذلك تميل الصخور المشبعة بالماء لأن تشوه تشوهاً لدناً أكثر من الصخور الجافة .

ومن الصخور التي تشوه تشوهاً لدناً الحجر الجيري والرخام والطفل والإردواز والفيليت والشست ، بينما تميل صخور الحجر الرملي والكوارتزيت والجرانيت والجرانوديوريت والنيس لأن تشوه بالكسر غالباً .

ولكي نفهم التشوه في الصخور ، فمن الضروري مناقشة العوامل الأساسية التي تتحكم في الخصائص الميكانيكية للصخور ، وهى : الحرارة ، والإجهاد الحابس والزمن ، ومعدل الانفعال ، والتركيب . ونعرض فيما يلى وصفاً لكل من هذه العوامل :

1. الحرارة

كلما ارتفعت درجة الحرارة ، أصبحت المادة الصلبة أكثر لدونة وأقل تقصفاً . فمثلاً يصعب ثنى قضيب من الزجاج عند درجة حرارة الغرفة ، وإذا حاولنا ثنيه بشدة ، فإنه ينكسر لأنه يتكون من مادة قصيفة . ومع ذلك .. فإن هذا القضيب يصبح لدناً ويسهل ثنيه إذا سُخِّنَ حتى درجة الاحمرار . وتشبه الصخور قضيب الزجاج ، حيث تنكسر عند سطح الأرض ، بينما تصبح لدنة في الأعماق بسبب تدرج حرارة الأرض في geothermal gradient ، وهو معدل الزيادة في درجة حرارة الأرض مع العمق .

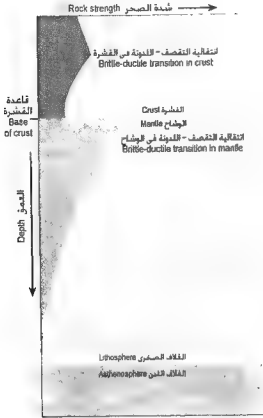
2. الإجهاد الحابس

الإجهاد (الضغط) الحابس confining stress هو ضغط منتظم يؤثر على الصخور من جميع الجهات نتيجة وزن كل الطبقات التي تعلو هذه الصخور (انظر شكل 2.8) . ويعوق الإجهاد الحابس العالي تكوّن الكسور ، ولذلك فهو يقلل من صفات التقصف . فعند الإجهاد الحابس العالي يصبح من السهل على المادة الصلبة أن تشوه دون أن تنكسر .

3. الزمن ومعدل الانفعال

يلعب الزمن دوراً مهماً في تشوه الصخور ، إلا أنه لايسهل رصد هذا الدور بسهولة . فعند تعرض مادة

د. صفات التقصف واللدونة في الغلاف الصخري



شكل (7.10): رسم توضيحي لطريقة تغير شدة الصخر مع العمق . حيث توجد ذروتا تقصف-لدونة في القشرة والوشاح . والحديث بين الغلاف الصخري والغلاف اللين (الاستينوسفير) هو العمق الذي يخضع عنده التشوه .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

II. تفسير نتائج الحقل

يحتاج الجيولوجيون إلى معلومات دقيقة عن وضع الطبقات التي يدرسون تشوه صخورها . والمكتشف outcrop هو المصدر الرئيسي لهذه المعلومات ، حيث لا تخجب التربة أو الحطام الصخري regolith المكون من الكتل الصخرية المفككة صخر الأساس bed rock الذي يتواجد تحت سطح الأرض في كل مكان (شكل 6.3) . ويوضح شكل (8.10) طبقات رسوية تعرضت للطي . وفي أغلب الأحيان ، فإن الصخور المطوية تكون منكشفة جزئياً وتبدو كطبقات مائلة فقط . ويكون توجيه orientation الطبقة (بمعنى

تعرف شدة الصخر rock strength بأنها أقصى إجهاد يتحملة الجسم الصلب ، دون أن يتمزق أو يتكسر . ويلاحظ تزايد شدة الصخر مع العمق باطراد حتى تصل إلى ذروتين (شكل 7.10) . ويرجع السبب في ذلك ، إلى أن شدة الصخر تعتمد على تركيب الصخر ودرجة الحرارة والضغط .

وتتميز صخور القشرة الأرضية القارية بأنها غنية بمعدن الكوارتز ، ولذلك تحدد شدة الكوارتز صفات الشدة في صخور القشرة الأرضية . وتزداد شدة الصخر باطراد حتى عمق نحو 15 كم ، حيث تكون الصخور قوية فوق ذلك العمق ، وتتكسر وتشوه بالتقصف . وتصبح الكسور أقل شيوعاً تحت عمق 15 كم حيث يزيد الإجهاد الحابس ، وتصبح الصخور أكثر لدونة . ويعرف العمق الذي تبدأ عنده صفات اللدونة في السيادة على صفات التكسر بانتقالية التقصف - اللدونة brittle-ductile transition .

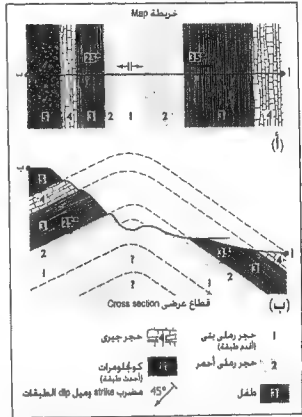
وتتميز صخور الوشاح بغياب معدن الكوارتز ، بينما تكون غنية بمعدن الأوليفين . ومعدن الأوليفين أقوى من معدن الكوارتز ، لذلك لا تصل انتقالية التقصف - اللدونة في الصخر الغني بالأوليفين إلا عند عمق نحو 40 كم . لذلك توجد ذروة ثانية لشدة الصخر عند هذا العمق (شكل 7.10) . وتقل شدة الصخر مرة أخرى تحت انتقالية التقصف - اللدونة في الوشاح . وكما هو معروف .. فإن قوة الصخر تكون صغيرة جداً عند درجة حرارة نحو 1300 °م ، ولذلك يكون التشوه غير ممكن عن طريق التقصف . ويحدد اختفاء كل صفات التشوه بالتقصف ، الحد بين الغلاف الصخري والغلاف اللين (الاستينوسفير).

يكون أفقياً دائماً (شكل 9.10 أ). وتكون كل الخطوط الأفقية موازية لبعضها البعض على المستوى المائل. ويمكن تخيل هذا الخط بأنه الخط الناتج عن تقاطع طبقة مائلة مع مستوى الماء في بحيرة (شكل 9.10 ب)، حيث يكون سطح البحيرة أفقياً. ويعرف هذا التقاطع بالمضرب. ويمكن تعريف خط المضرب **strike** بأنه اتجاه يتحدد بالبوصله كخط أفقى يتكون نتيجة تقاطع مستوى أفقى مع مستوى مائل. وبعد تحديد خط المضرب، نحدد بدقة اتجاه ميل المستوى المائل. وتعرف زاوية الميل **angle of dip** بأنها الزاوية المحصورة بين مستوى أفقى ومستوى مائل. ويقاس اتجاه الميل **direction of dip** في اتجاه عمودى على اتجاه المضرب (شكل 9.10 ب). ويحتوى وصف الجيولوجى لكشف الطبقة على المضرب والميل، فيقول مثلاً إنه "طبقة من الحجر الرملى خشن التجب لها مضرب اتجاهه شمال - جنوب، وتميل بزاوية قدرها 30° نحو الغرب".

ب. عمل خريطة جيولوجية وقطاع عرضى

تعتبر الخريطة الجيولوجية وسيلة مريحة وسهلة لترتيب وتنظيم المعلومات الجيولوجية. حيث يسجل الجيولوجيون عليها مواقع المكتشفات، وطبيعة وأنواع الصخور في تلك المكتشفات وعمرها ومضارب وميول الطبقات المائلة. كما يساعد عمل قطاع عرضى جيولوجى في منطقة ما على وضع تصور للتاريخ الجيولوجى في تلك المنطقة. والقطاع العرضى الجيولوجى **geologic cross section**، هو شكل يوضح المعالم التى يمكن رؤيتها إذا قطعنا مقطعاً رأسياً في جزء من القشرة الأرضية. ويمكن أحياناً رؤية قطاع عرضى طبيعى عند مشاهدة الواجهة الرأسية لجرف أو معجر، أو عندما يتم قطع جزء من منطقة جبلية لمد طريق أو خندق. ويمكن أيضاً عمل القطاع العرضى

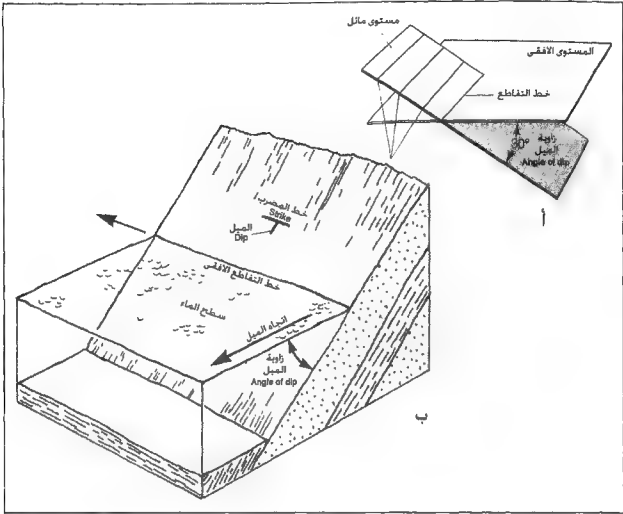
تحديد اتجاهات الطبقة بدقة على الأرض بالنسبة لاتجاهات البوصله) مفتاحاً مهماً يمكن استخدامه لوضع تصور عن كل التركيب المشوه. وهناك قياسان فقط لوصف توجه طبقة من الصخور منكشفة في منطقة ما هما المضرب **strike** والميل **dip**. ونعرض فيما يلى وصفاً لهما:



شكل (8.10). خريطة جيولوجية (أ) وقطاع عرضى مسددهما (ب). ويوضح ترتيب الطبقات أن الطبقة (1) عند القاع هي الأقدم، وأن الطبقات التى تعلوها على الجانبين هي الأحدث على التوالي. وتوضح الخطوط المنقطعة الجزء الذى تم ترميزه من الطبقة، بتوصيل الطبقات المتماثلة (التي تحمل نفس الرقم) وملاءمة الليل. (After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

أ. قياس المضرب والميل

لكى نقيس اتجاه مستوى مائل، فلا بد من التعرف على المبدأين الهندسيين اللذين ينصان على أن: (1) تقاطع أى مستويين يكون عبارة عن خط، و(2) الخط الناتج عن تقاطع مستوى مائل مع مستوى أفقى،



شكل (9,10).

- المبادئ الهندسية المستخدمة لقياس اتجاه وزاوية ميل مستوى مائل .
- خط المضرب والميل يمكن تخيل خط المضرب strike بأنه الخط الناتج عن تقاطع الطبقة المائلة مع مستوى الماء في البحيرة ، بنينا يقاس اتجاه الميل dip في اتجاه عمودي على اتجاه المضرب . وزاوية الميل هي الزاوية المحصورة بين مستوى أفقى ومستوى مائل مقاسة أسفل المستوى الأفقى .

إعادة بناء الأشكال المشوهة لطبقات الصخور ، إذا ما أزيلت التعرية أجزاء من التكوّنات الصخرية . ولا بد أن يلاحظ الجيولوجي أولاً بعض المعالم مثل الطبقات الرسوبية ، والتي ترسبت أفقية عند قاع البحر ، فإذا وجدت هذه الطبقات مائلة الآن ، كما هو موضح في الشكل ، فذلك يعنى أن أحداثاً لاحقة قد أدت إلى أن تميل الصخور وتتحنى . ويدلنا قانون تعاقب الطبقات (الطبقات الأحدث يتم ترسيبها فوق طبقات أقدم) على أى الطبقات هي الأقدم (طبقة

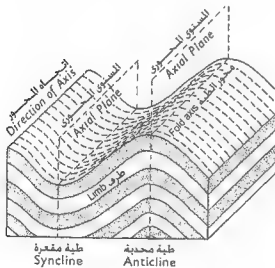
من المعلومات الموضحة على الخريطة الجيولوجية. ويوضح شكل (8,10) خريطة جيولوجية مبسطة لمنطقة تظهر بها صخور رسوبية ، حيث طويت الصخور الرسوبية التي كانت أصلاً أفقية ، بالإضافة إلى قطاع عرضي مستمد من الخريطة .

ويمكن ملاحظة أن الخريطة والقطاع العرضي في شكل (8,10) يمثلان أجزاء من طية تم تعرية وإزالة أجزاء منها منذ زمن طويل . ويستطيع الجيولوجي

ستتيمترات . وقد تُطوى الطبقات بلطف أو بعنف ، تبعاً لشدة القوى السائدة وقت التشوه والفترة الزمنية التي تعرضت فيها الصخور للتشوه وقابلية الطبقات لمقاومة التشوه .

أ. أنواع الطيات

إن أبسط أنواع الطيات ما يسمى بالطية أحادية الميل **monocline** حيث تميل بعض الطبقات الأفقية أو المائلة بزاوية صغيرة في اتجاه واحد ، وبزاوية أكبر من زاوية الميل السائدة . ويمكن تخيل الطية أحادية الميل بسهولة ، إذا وضعنا كتاباً على منضدة ثم وضعنا منديلاً فوق أحد جوانب هذا الكتاب بحيث يتلى بقية المنديل على المنضدة ، فإن ثنية المنديل تعطي الكتاب شكل طية أحادية الميل . إلا أن معظم الطيات تكون أكثر تعقيداً من هذا النموذج . فالطي إلى أعلى على هيئة قوس يسمى تحديداً (طية محدبة) **anticline** ، بينما يسمى الطي لأسفل على هيئة زورق تقعرها (طية مقعرة) **syncline** (شكل 10.10) . وعادة ما تستلزم



شكل (10.10): طيات متماثلة توضح معنى المستوى للحموري والمحور. لاحظ أن السطح العلوي لا يمثل سطح الأرض ، ولكنه يمثل سطح طبقة معينة في التتابع

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

التحركات والتعقيدات . وتسمى الطبقات المكوّنة

رقم 1) ، وأن الطبقات التي تعلوها على الجانبين هي الأحداث على التوالي . ويستطيع الجيولوجي باستخدام ميل الطبقات أن يقوم بعمل قطاع عرضي - وهو مقطع رأسي كما لو كان موجوداً على امتداد الخط A-B على الخريطة . ونلاحظ أن الطبقات على كلا جانبي المتكون تكون متماثلة . وعند توصيل هذه الطبقات بخطوط متقطعة تتلاءم مع الميول الملحوظة ، فإنه يمكن إعادة بناء حدود أجزاء الطبقات التي تم إزالتها بالتعرية . ولكي تكمل القطاع العرضي ، فإننا نسقط امتداد الطبقات تحت سطح الأرض ، على الرغم من عدم رؤيتها .

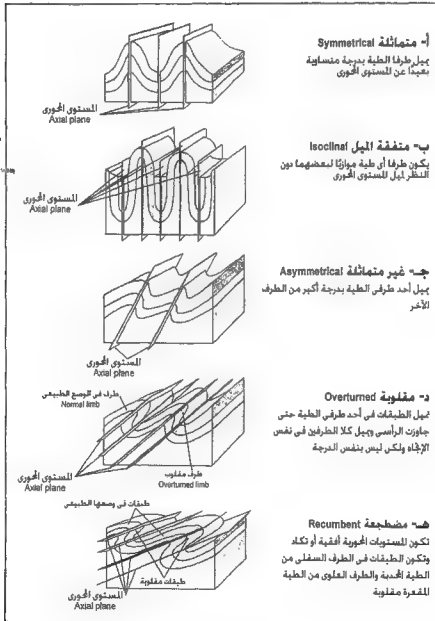
ويوضح شكل (8.10) أن محيطاً قديماً (غير موجود الآن بالطبع) ترسب على قاعه تتابع من الصخور الرسوبية ، ثم تعرضت هذه الصخور والتي كانت أصلاً في وضع أفقي لقوى تضاعطية في القشرة سببت ثنيهاً في طيات ورفعتها فوق سطح البحر . ولقد أزيلت التعرية جزءاً كبيراً من القطاع ، وتركت البقايا الموجودة اليوم والتي تم تمثيلها بالخريطة والقطاع العرضي .

III. التشوه بالنثي: طي الصخور

تمثل الطيات والكسور أدلة على تشوه الصخور . حيث يقوم الجيولوجيون بإعداد خرائط لها في الحقل . وتؤدي دراسة مثل هذه التراكيب إلى الوصول إلى نظرة شاملة عن القوى التي نشأت من تكتونية الألواح . ويعني مصطلح طية **fold** أن صخوراً كانت في الأصل أفقية قد تعرضت للطي لاحقاً . وقد ينتج التشوه إما عن قوى أفقية أو رأسية في الأرض ، مثلما ندفع قطعة من الورق في اتجاهين متقابلين أو من أسفل إلى أعلى فيحدث الطي . والطي شكل شائع للتشوه يمكن ملاحظته في كل أنواع الصخور وخاصة المتطبقة منها ، وهو يوجد بصورة نموذجية في أحزمة الجبال . وتكون الطيات ضخمة في سلاسل الجبال الحديثة والتي يتم تجوئتها بالتعرية حيث يبلغ طول بعضها عدة كيلومترات . كما قد تكون بعض الطيات في حدود عدة

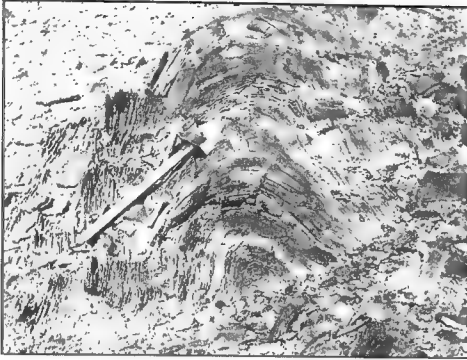
جناحها بلطف وبدرجة متساوية عن المحور ، كما قد تكون غير متماثلة ؛ نتيجة الإجهاد الشديد الذي يسبب بعض التعقيدات في الشكل . ويوضح شكل (11.10) بعض الأشكال الشائعة للطيات ، بينما يوضح شكل (12.10) أمثلة لبعض الطيات في صخور القاعدة بالصحراء الشرقية بمصر .

الجانبى الطية بالطرفين **limbs** ، بينما يطلق على المستوى التخليى الذى يقسم الطية إلى نصفين متماثلين تقريبا بالمستوى المحورى **axial plane** . ويسمى الخط الناتج عن تقاطع المستوى المحورى مع الطبقات بمحور الطية **fold axis** (شكل 10.10) . وقد تكون الطيات متماثلة **symmetrical folds** وكذلك الموضحة في شكل (10.10) ، وهى التى يميل



شكل (11.10): خسة أنواع مختلفة من الطيات .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).



أ



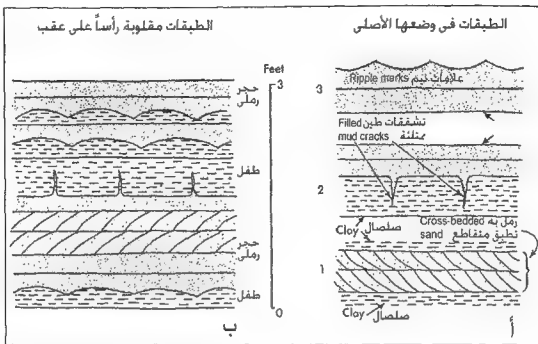
ب

شكل (12.10): أمثلة لبعض الطيات في صخور القاعدة بالصحراء الشرقية - مصر .

(أ) طية مفتوحة open fold في صخور النيس ، منطقة حفافيت - الصحراء الشرقية - مصر .

(ب) طية مضطحمة recumbent fold في متكون الحديد الشريطي ، جبل الحديد - الصحراء الشرقية - مصر (أ.د. عمود فوزي الرملي ، هيئة المساحة الجيولوجية).

وقد تكون الطية مفتوحة open fold (شكل 12.10 أ) إذا كانت الزاوية بين جناحيها أكثر من 90°. الطية أكثر إحكاما ويصبح جناحاها موازيين لبعضهما البعض ، وتوصف هذه الطية بأنها طية متفقة الميل وكلما زادت شدة الإجهاد التضاعطي ، كان جناحا

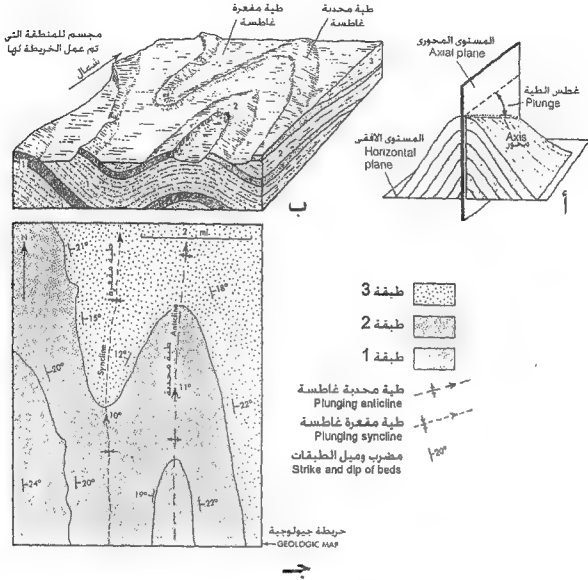


شكل (13.10): استخدام علامات النيم ripple marks وتشققات الطين mud cracks والتطبيق cross-bedding في تحديد الوضع الأصلي للطبقات الرسوبية .
 (أ) الطبقات في مكانها ووضعها الأصلي كما كانت أثناء تكوّنها ، حيث تكون التراكيب الرسوبية في وضعها العادي .
 (ب) الطبقات نفسها ، والتي كانت أصلاً في وضع أفقي ثم قلبت رأساً على عقب .

الطبقات هي المقلوبة. علماً بأن هذا ليس ميسوراً دائماً ، وخصوصاً إذا أزيلت أجزاء من الطيات بالتعرية . وتساعد أحياناً التراكيب الرسوبية ، مثل : الشقوق الطينية والطبقات المتدرجة graded layers في تحديد الوضع الأصلي للطبقات (شكل 13.10).

ويوضح شكل (10.10) طية ذات محور أفقي . أما إذا كان محور الطية مائلاً على المستوى الأفقي ، فتسمى الطية غاطسة plunging fold (شكل 14.10) وشكل (15.10). وتسمى الزاوية بين محور الطية والأفق بغطس الطية plunge . وقد يميل محور الطية في اتجاهين ، وتعرف الطية حينئذٍ بالطية مزدوجة الغطس double plunging fold .

isoclinal fold (شكل 11.10 ب) . ويسبب الإجهاد الشديد أيضاً إما أن تصبح الطية غير متماثلة asymmetrical ، حيث يميل جناحها بدرجات ميل مختلفة (شكل 11.10 ج) ، وإما تكون مقلوبة overturned fold ، حيث يميل جناحها في الاتجاه نفسه (شكل 11.10 د) . وفي النهاية ، فإن الطية المقلوبة overturned fold يمكن أن تصبح طية مضطجعة recumbent fold حيث يكون جناحها في وضع أفقي أو قريب من ذلك (شكل 11.10 هـ و 12.10 ب) . ويكثر وجود الطية المضطجعة في مناطق التصادمات القارية ، مثل جبال الألب والهمالايا . وفي حالة الطيات المقلوبة والطيات المضطجعة ، فإنه من الضروري معرفة الوضع الصحيح للطبقات ، وأي



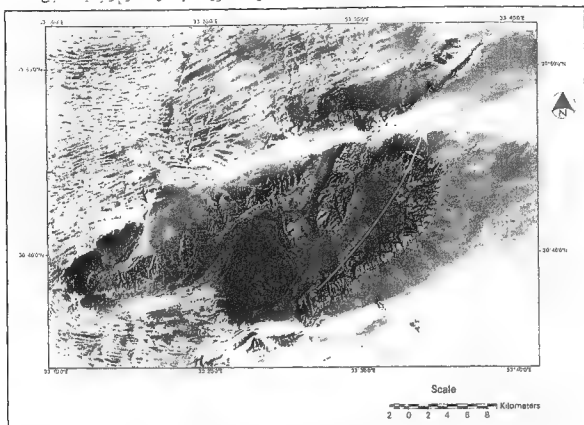
شكل (14.10): التحديدات والتعرجات الغاطسة

أ. غطس طية محدبة

ب. التحديدات والتعرجات كما تظهر في شكل مجسم . ويوضح المجسم الأشكال الطوبوغرافية المميزة الناتجة عن تعرية أنواع مختلفة من الصخور مما يدل على وجود طيات غاطسة . لاحظ أن الطبقات المقاومة للتعرية (الطبقتان 2 و 3) تكوّن مرتفعات عالية في كل من الطيات المحدبة والقاطسة ، بينما تكون الطبقات السهلة التعرية (طبقة 1) منخفضة طوبوغرافيا في كل من التحديدات والتعرجات الغاطسة . جـ. خريطة جيولوجية للمنطقة .

(شكل 14.10 ب و ج) فوق سطح الأرض الذي تم تسويته بالتعرية حرف V أو شكل حدوة الحصان بدلا من نمط الشرائط المتوازية تقريبا للطبقات في الطيات غير الغاطسة (شكل 8.10) . ومع ذلك فإنه

ويلاحظ تلاشى محور الطية المحدبة عند تتبعه في الحقل . وتبدو الطية أنها تغطس في الأرض عندما تقتضى ، كما يحدث لتجعدات قطعة قياس فوق المنضدة . ويشبه نمط الطبقات المنكشفة في الطبقات الغاطسة



شكل (15.10). صورة فضائية لثلاثة جبال المغارة بشمال سيناء - مصر ، توضح طية محدبة غاطسة . (لاحظ وجود قبة في الجزء الجنوبي الغربي من طية المغارة) .

الدائري أو البيضوي المميز لها . والقباب ذات أهمية خاصة في جيولوجيا النفط ، نظرا لأن النفط والغاز يهاجران إلى أعلى القبة خلال الصخور المنفذة . فإذا كانت الصخور عند أعلى نقطة في القبة صعبة الاختراق ولا يسهل تسرب المواد البترولية منها ، فإن النفط أو الغاز أو كليهما يتجمع داخل القبة . وينبغي تأكيد أن توافر الشروط التركيبية والصفات الصخرية المناسبة والتي تصلح كمستودع لا يعنى حتماً وجود النفط أو الغاز أو كليهما .

ويعزى تكون بعض القباب إلى الصخور النارية التي تتداخل في القشرة لتدفع الرسوبيات التي تملؤها إلى أعلى . وتتكون بعض الأحواض عندما يبرد جزء ساخن من القشرة الأرضية وينكمش ؛ مما يؤدي إلى هبوط الرسوبيات التي تملؤها . ويتكون البعض الآخر

يمكن التمييز بين الطيات المحدبة الغاطسة والطيات المقعرة الغاطسة بالطريقة نفسها التي نستخدمها في حالة الطيات غير الغاطسة ؛ أي باستخدام الميل والأعمار النسبية للطبقات . ويوضح شكل (16.10) طية مزدوجة الغطس بجبل حافيت بالعين بدولة الإمارات العربية المتحدة .

والقبة dome نوع من الطيات المحدبة لها مقطع دائري أو إهليلجي تمثل فيها الطبقات بقدر متساوٍ من نقطة معينة مركزية إلى الخارج في جميع الاتجاهات (شكل 17.10 أ) . أما الحوض basin فهو طية مقعرة تشبه الطبق ، يكون ميل الطبقات فيه من كل الجوانب نحو نقطة مركزية (شكل 17.10 ب) ، وقد يبلغ قطر القبة أو الحوض عدة كيلومترات . ويمكن تعرف القباب والأحواض في الحقل من الشكل



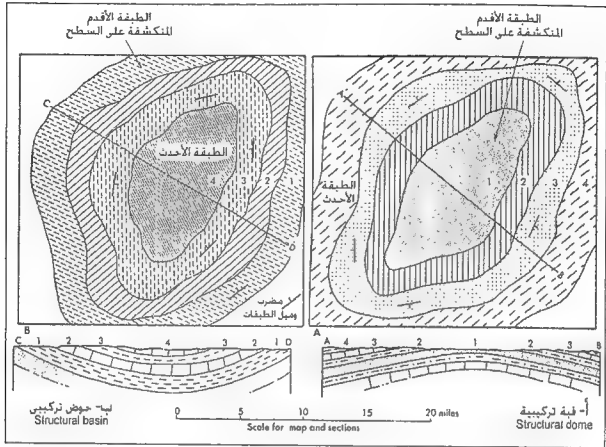
شكل (16.10): صورة فضائية توضح طية مزدوجة الغطس double plunging fold في منطقة جبل حافيت بالعين - الإمارات العربية المتحدة .

عندما تسبب بعض القوى التكتونية استطالة ومط القشرة الأرضية ، كما يؤدي وزن الصخور الرسوبية المترسبة في بحر ضحل إلى تقعر القشرة الأرضية .

ب. الاستنتاجات من طي الصخور

من الصعب تعرف بعض الطيات بسبب تأثير عوامل التعرية . بينما يمكن في بعض الحالات التعرف على التحدب الذي تم تعريته من وجود طبقات أقدم في لب الطية المحقّرة تحيط به من الجانبين صخور أقدم عمرا (حديث) ، وغيل إلى الداخل (شكل 11.10) .

ويؤدي الاختلاف في درجة تعرية الطبقات المطوية إلى تكوّن أشكال طوبوغرافية مميزة تدل على وجود



شكل (17,10): نشأة قبة وحوض تركيبيان. حيث يتبع نشأة التراكيب ثمرية تؤدي إلى تكون أسطح مستوية تقريباً ؛ مما يؤدي إلى تكون أنشباط متشابهة على الخريطة الجيولوجية .

- (أ) قبة dome . لاحظ أن أقدم الطبقات المكتشفة تكون في المركز ، وأن الطبقات في المقطع العرضي تشبه طبقة محدبة .
(ب) حوض basin . لاحظ أن أحدث الطبقات المكتشفة تكون في المركز ، وأن الطبقات في المقطع العرضي تشبه طبقة مقعرة .

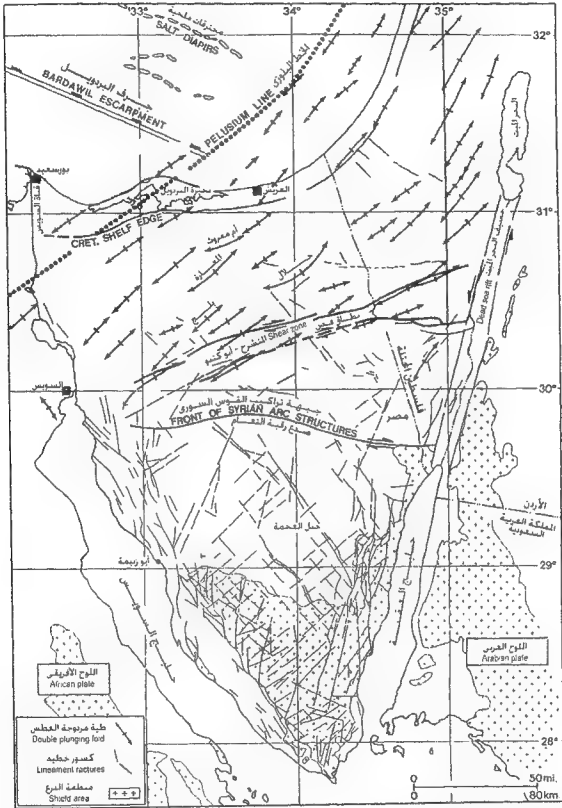
وقت واحد بقوى تكتونية أفقية ، قد تكون نشأت من تصادم الألواح ، مثل نظام القوس السوري Syrian arc system (شكل 18.10) ، والذي يضم مجموعة من الطيات المستطيلة في شمال سيناء بمصر ، وفي فلسطين وسوريا ، وتأخذ اتجاه شمال شرق - جنوب غرب .

IV. التشوه بالكسر: الفواصل والصدوع

تميل الصخور القشرة الأرضية ، خاصة تلك القريبة من السطح ، لأن تكون قصفة . ونتيجة لذلك ، فإن

الطيات ؛ فقد يتكون وادي في وسط طية مقعرة أو حيد مرتفع عند قمة طية محدبة . ومع ذلك ، فإنه من المهم معرفة أنه ليس من الضروري أن تكون كل التحدبات أعرافاً ridges أو تلالاً ، أو أن تكون كل التفرعات وديانا .

وتوجد الطيات في مجموعات مستطيلة عادة . وتسمى المنطقة الطولية التي تعرضت للطى وغيره من مظاهر التشوه بحزام طى fold belt . ويستدل من أحزمة الطى على أن الصخور المنطقة قد ضغطت في



شكل (18.10): خريطة تكتونية تين القوس السوري في شمال سيناء بمصر وفلسطين، الذي يضم مجموعة من الطبقات والقيادات المستطيلة التي تأخذ اتجاه شمال شرق - جنوب غرب.

(After Jenkins, D., 1990, North and Central Sinai, In: The Geology of Egypt, ed. R. Said, Balkema, Rotterdam).

وقد تتكون الفواصل في اللابة نتيجة انكماشها أثناء تبردها وانخفاض درجة حرارتها. ومن أمثلة ذلك الفواصل العمودية **columnar joints** والتي توجد في البازلت (شكل 20.10)، وتؤدي إلى تقسيم الصخر إلى أعمدة أو منشورات طويلة. وليس من الضروري تكوين فواصل عمودية في البازلت، فهناك طفوح بازلتية تقطعها فواصل عادية.

ومعظم الفواصل تكون لها أسطح مستوية تقريبا، ولا بد من تحديد اتجاه المضرب ومقدار الميل واتجاهه عند وصف الفاصل. ولا توجد الفواصل وحيدة أبدا، بل توجد في مجموعات تتكون من أعداد كبيرة، وتعرف مجموعة الفواصل التي تكون أسطحها متوازية تقريبا "بمجموعة فواصل joint set". أما نظام الفواصل **joint system** فيشمل مجموعتين أو أكثر من مجموعات الفواصل المتقاطعة، والتي قد تكون من العمر نفسه أو ذات أعمار مختلفة (شكل 19.10).

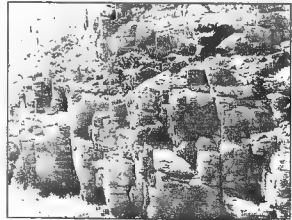
وتكون هذه الفواصل عادة بداية لمجموعة من التغيرات التي تؤثر بدرجة ملحوظة في الصخور. فالواصل مثلا، تعمل كقنوات يصل من خلالها الماء والهواء إلى عمق الصخور؛ مما يؤدي إلى زيادة سرعة التجوية وضعف التركيب الداخلي. وإذا تقاطعت مجموعتان أو أكثر من الفواصل، فقد تسبب التجوية تكسر الصخور إلى كتل أو أعمدة كبيرة.

وترجع أهمية تحديد نظم الفواصل إلى أن الجيولوجيين قد يجدون أحيانا رواسب خامات ذات قيمة اقتصادية عند فحص أنظمة الفواصل. فقد تهاجر نحائيل مائة ساخنة حاملة للذهب إلى أعلى خلال نظام من الفواصل، حيث يترسب معدنا الكوارتز والذهب في الشقوق. كما قد تكون المعلومات الدقيقة عن الفواصل مهمة أيضا عند تخطيط وإنشاء المشروعات الهندسية الكبيرة، خاصة السدود والخزانات. فقد

الصخور عند سطح الأرض أو بالقرب منها تقطع بعدد لا نهائي من الكسور، تسمى فواصل أو صدوعا. والفاصل **joint** هو نوع من الكسور لم تحدث أية حركة على امتداده. أما الصدع **fault** فهو كسر حدثت حركة نسبية للصخور على جانبيه موازية لسطح الكسر.

أ. الفواصل

تنتشر الفواصل في كل المنكشفات تقريبا، والتي تكون نتيجة تأثير القوى التكتونية. وتكسر الصخور بسهولة أكثر عندما تتعرض للشد أو الضغط، مثل أية مادة قصيفة أخرى، عند نقاط الضعف. وقد تكون نقاط الضعف عبارة عن شروخ دقيقة أو كسرات من مواد أخرى أو حتى أحافير. وتؤثر القوى الإقليمية التي تضم قوى التضاعف والشد والقص على الصخور، وعندما تتلاشى تلك القوى بعد ذلك فإنها تترك أثرا في الصخور في صورة مجموعة من الفواصل (شكل 19.10). وقد تتكون الفواصل أيضا بسبب غير تكتوني، نتيجة تمدد وانكماش الصخور عندما تزيل التعرية طبقات من فوق السطح. وتسبب إزالة هذه الطبقات تقليل الضغط الحابس على الصخور تحتها، مما يسمح للصخور لأن تتمدد وأن تتجزأ عند نقاط الضعف.



شكل (19.10): مجموعات فواصل joint sets تتقاطع وتكون نظام فواصل joint system في صخور التشت بواي أم لصيفة - الصحراء الشرقية - مصر.



شكل (20,10): الفواصل العمودية columnar joints في صخور البازلت ، بالوحدات البحرية - الصحراء الغربية - مصر . (أ.د. محمد عبد الفتاح حسن ، هيئة المواد النووية).

كاليفورنيا، والذي يبلغ طوله نحو 1000 كم إزاحة أفقية ، قد تصل إلى مئات الكيلو مترات نتيجة انزلاق اللوحين أفقياً بالنسبة لبعضها البعض . وقد تكون القوى في القشرة الأرضية داخل الألواح قوية أيضاً ؛ مما يسبب تكوّن صدوع بعيداً عن حدود الألواح.

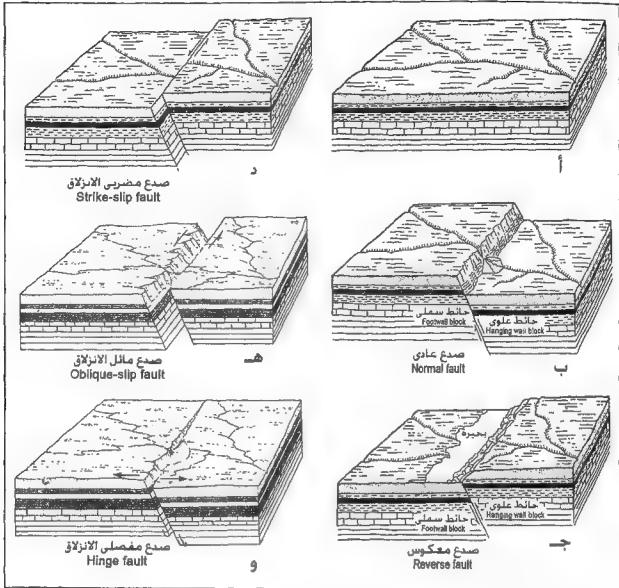
• الإزاحة النسبية

إن معرفة مقدار الحركة التي حدثت على امتداد الصدع ، وكذلك الجانب من الصدع الذي تحرك ، تكون غير ممكنة عموماً . وقد يمكن في حالة مثالية قياس مقدار الحركة أو الإزاحة إذا وجدنا مثلاً حصاة واحدة من الكونجلومرات قد تم قطعها بواسطة الصدع ، وأن النصفين تحركا لمسافة يمكن قياسها . وحتى في هذه الحالة ، فإنه من غير الممكن تحديد أي

يكون صخر الأساس عند الموقع المقترح به عديد من الفواصل ؛ مما قد يؤدي إلى انهيار الخزان أو تسرب الماء منه ، ويكون إنشاء الخزان من الخطورة بمكان .

ب. الصدوع

بينما تشير الطيات عادة إلى أن القوى التضاغية كانت سبب تكوينها ، فإن الصدوع تتكون نتيجة لأنواع القوى الثلاث: التضاغية compressive والشد tension والقص shear . وتكون هذه القوى شديدة ، خاصة عند حدود الألواح . وعموماً ، فإن الصدوع من المعالم الشائعة في أحزمة الجبال ، والتي تكون مصاحبة لتصادم الألواح ، كما تشيع الصدوع أيضاً في وديان الحسف ، حيث تنفصل الألواح وتشد نتيجة تحركها في اتجاهات متضادة . وتظهر بعض الصدوع الناقلة مثل صدع سان أندرياس في



شكل (21.10): الأنواع الرئيسية الشائعة من الصدوع
(أ) كتلة غير متصدعة (مكسورة فقط).

ب) صدع عادي normal fault، حيث يتحرك الحائط العلوي إلى أسفل بالنسبة للحائط السفلي.
ج) صدع معكوس reverse fault، حيث يتحرك الحائط العلوي إلى أعلى بالنسبة للحائط السفلي.
د) صدع مضربي الانزلاق strike-slip fault، حيث تكون الحركة الأساسية أفقية وموازية لضرب الصدع، والصدع الموضح صدع يساري الانزلاق.

هـ) صدع مائل الانزلاق oblique-slip fault، حيث تكون الحركة أفقية على امتداد للضرب ورأسية لأعلى أو لأسفل في الوقت نفسه.
و) صدع مفصلي hinge fault، حيث تكون حركة أحد الجانبين دورانية على محور متعامد على مستوى الصدع.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

كتلة بقيت وأي كتلة تحركت، أو أن كلا الكتلتين قد تحركتا. وعند تصنيف حركات الصدع، فإنه يمكن تحديد الإزاحة النسبية relative displacement (21.10ب) يظهر أن هناك إزاحة على جانبي الصدع، فقط، بمعنى أن جانبا واحدا من الصدع قد تحرك في اتجاه معين بالنسبة إلى الجانب الآخر. ففى شكل

• الصدوع العادية

تحدث الصدوع العادية نتيجة إجهادات شد تعمل على جذب القشرة وفصلها . كما تنشأ هذه الصدوع أيضا نتيجة الإجهادات التي تنشأ عن الدفع من أسفل ، والتي تعمل على شد القشرة الأرضية . والصدع العادي **normal fault** هو الصدع الذي يتحرك فيه الحائط العلوى إلى أسفل بالنسبة للحائط السفلى (شكل 21.10 ب) .

ومن الشائع وجود صدعين عاديين أو أكثر مضاربيهما متوازية ، ولكن تكون ميولها متضادة وتضم كتلة من القشرة الأرضية يزيد طولها عن عرضها وتحركت إلى أعلى أو إلى أسفل . وعندما تحسف كتلة صخور بين صدعين عاديين وهبوطها بالنسبة لما يحيط بها من كتل صخرية ، فإن ذلك يعرف بخسيف **rift valley** أو أخدود **graben** (شكل 22.10 أ) . وإذا حدث الهبوط على امتداد صدع واحد فقط ، فإنه يتكون نصف أخدود **half graben** (شكل 22.10 ب) . وقد ترتفع الكتلة الطولية بين الصدعين العاديين بالنسبة لما حولها ارتفاعا نسبيا لتكون جسرا (نتقا) **horst** (شكل 22.10 ج) . وتجدر الإشارة إلى أن الوادى ذى الحواف حادة الانحدار ، والذي يوجد عند منتصف حيود وسط المحيط الأطلنطى ويستمر فى جزيرة أيسلندة هو وادى خسف . ومن أشهر الأمثلة أيضا وادى الخسف الإفريقى **African Rift Valley** ، والذي يمتد عبر دول شرق إفريقيا لمسافة تزيد على 6000 كم فى اتجاه شمال - جنوب ، حيث صعدت الصحارة خلال أجزاء من وادى الخسف ، وعلى امتداد سطوح الصدوع ، لتكوّن براكين . ومن الأمثلة الشهيرة أيضا وديان الخسف التى يشغلها البحر الأحمر وخليج السويس (شكل 23.10) ، وكذلك خسيف وادى الراين فى غرب أوروبا .

ويمكن فقط معرفة أن الجانب الأيمن قد تحرك لأسفل بالنسبة للجانب الأيسر . ولذلك تمثل الحركة النسبية على القطاع العرضى بهمين ؛ لأننا لانستطيع عموما تحديد أى الكتلتين تحركت فعليا .

• الحائط العلوى والحائط السفلى

معظم الصدوع تكون مائلة ، بمعنى أن لها ميلا **dip** . ويستخدم المصطلحان السابقان الميل والمضرب لوصف توجيه الصدوع . ولوصف الميل فى الصدوع تسمى كتلة الصخر أعلى سطح الصدع المائل بالحائط العلوى **hanging wall block** ، بينما تسمى كتلة الصخر أسفل سطح الصدع المائل بالحائط السفلى **footwall block** . ولا تستخدم هذه المصطلحات بالطبع فى حالة الصدوع الرأسية ، حيث إن الكتلتين اللتين يفصلهما الصدع الرأسى تقعان على جانبيه .

1. تصنيف الصدوع

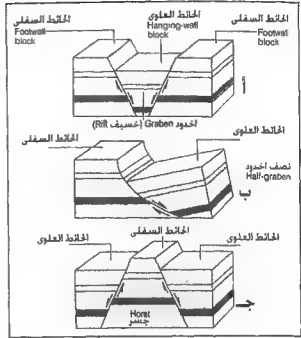
تصنف الصدوع بناءً على ميل الصدع واتجاه الحركة النسبية على جانبيه . ويسمى تقاطع سطح الصدع مع المستوى الأفقى مضرب الصدع **fault strike** ، وميل الصدع **fault dip** هو الزاوية التى يصنعها سطح الصدع المائل مع المستوى الأفقى ، وتقاس أسفل المستوى الأفقى . ويسمى تقاطع الصدع مع سطح الأرض بأثر الصدع **fault trace** . ويوضح شكل (21.10) الأنواع الشائعة من الصدوع ، مع التغيرات التى قد تحدثها تحليا فى طوبوغرافية المنطقة المتأثرة بها . ويعتبر المستويان الرأسى والأفقى هما المستويان القياسيان اللذان يُرجع إليهما عند تصنيف الصدوع . وقد تكون الحركة فى الصدوع رأسية تماما أو أفقية تماما ، نأ قد تكون خليطا من كليهما .

• الصدوع المعكوسة وصدوع الدسر

تنتج الصدوع المعكوسة reverse faults من الإجهادات التضاغية ، حيث يتحرك الحائط العلوي نسبياً إلى أعلى بالنسبة للحائط السفلي شكل (21.10 ج). وتؤدي حركة الصدع المعكوس إلى تقصير القشرة الأرضية وزيادة سمكها . وهناك نوع خاص من الصدوع المعكوسة يسمى صدع الدسر thrust faults وهو صدع معكوس يميل مستواه بزاوية صغيرة تقل عن 45° غالباً في معظم امتداده . ومثل هذه الصدوع تكون شائعة في سلاسل الجبال المشوهة بشدة ؛ حيث تنتج صدوع الدسر نتيجة قوى تضاغية كبيرة في القشرة الأرضية ؛ مما يؤدي إلى اندفاع الحائط العلوي أفقياً لعدة كيلومترات فوق الحائط السفلي ، وتقصير القشرة الأرضية . ومن أمثلة صدوع الدسر في الصحراء الشرقية المصرية صدع وادي حفافيت (شكل 24.10).

• الصدوع مضربية الانزلاق

الصدع مضربي الانزلاق strike – slip fault هو صدع تكون الحركة الأساسية فيه أفقية ، ولذلك فإنها تكون موازية لمضرب الصدع (شكل 21.10 د). وتكون الصدوع مضربية الانزلاق نتيجة إجهادات القص أو الانزلاق . ومن أشهر أمثلة هذه الصدوع : صدع سان أندرياس في كاليفورنيا ، وصدع البحر الميت في المنطقة العربية . ويجدد اتجاه حركة الصدع الأفقية بالنظر إلى طول صدع مضربي الانزلاق ، فإذا وجدنا أن الحركة النسبية قد أدت إلى أن تكون الكتلة التي على اليسار وكأنها قد تحركت في اتجاه الرائي ، أو أن الكتلة التي على يمينه قد تحركت بعيداً عنه ، فإن الصدع يكون صدعاً مضربي الانزلاق يسارياً left lateral strike – slip fault أو صدعاً يسارياً sinistral fault . أما إذا وجدنا أن الحركة سببت تحرك الكتلة التي على يمينه نحوه والكتلة التي على يساره بعيداً عنه ،



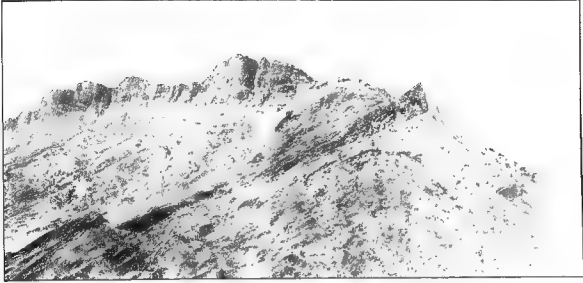
شكل (22.10): الجسور horsts والأخاديد grabens التي تنشأ عندما تؤدي إجهادات الشد إلى تكون صدوع عادية .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).



شكل (23.10): يتقاطع اللوح الإفريقي الذي تتواجد فوقه مصر عن اللوح العربي الذي تتواجد فوقه المملكة العربية السعودية ، حيث أدت قوى الشد إلى نشأة وادي خفس rift valley بالبحر الأحمر .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).



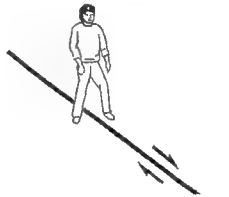
شكل (24.10): صدع دسر thrust fault في صخور النيس ، منطقة حفافيت - الصحراء الشرقية - مصر (مجموعة أ.د. محمود فوزي الرمي)

نطاق صدع البحر الميت (شكل 26.10) . وقد تسببت الحركة على جانبي تلك الصدوع في نشأة أربعة أحواض ملئت بالمياه فيما بعد ، منها البحر الميت وبحر الجليل . وقد نشأ نطاق البحر الميت منذ بداية فتح البحر الأحمر ، حيث تحركت القشرة الأرضية أفقياً على جانبي هذا الصدع الناقل لمسافة تقدر بنحو 105 كم.

ومعظم الصدوع الكبيرة والنشطة هي صدوع مضربيه الانزلاق . والسبب في ذلك أن الصدوع مضربيه الانزلاق ومراكز الانتشار ونطاقات الاندساس هي الأنواع الثلاثة من الحواف التي تحد الألواح التكتونية ، (الفصل الأول) . وتتصل حواف الألواح الثلاثة مع بعضها بعضاً لتكوّن شبكة متصلة تحيط بالكرة الأرضية . وقد كان العالم الكندي ويلسون J.T.Wilson أول من اقترح أن الصدوع مضربيه الانزلاق ، والتي تكوّن حدود الألواح هي نوع خاص من تلك الصدوع ، يمكن تسميتها بالصدوع الناقلة transform faults (شكل 11.1).

وتسمى الحركة الأفقية على امتداد المضرب ، والتي تكون في الوقت نفسه رأسية إلى أعلى أو إلى أسفل على

فيكون هذا صدعاً مضربياً الانزلاق يمينياً right lateral strike - slip fault ، أو صدعاً يمينياً dextral fault (شكل 25.10) . ويعتبر صدع سان أندرياس صدعاً مضربياً الانزلاق يمينياً . وتقدر الحركة التي حدثت على امتداده بنحو 600 كم أو أكثر منذ 65 مليون سنة على الأقل .



شكل (25.10): شكل يوضح صدعاً مضربياً الانزلاق يمينياً .
Right - lateral strike - slip fault.

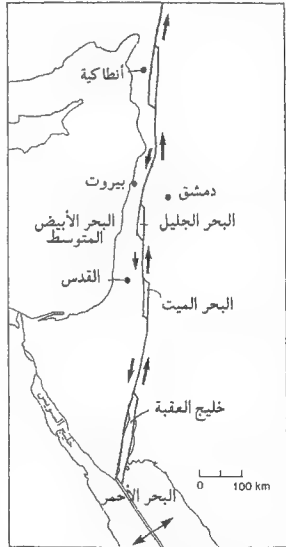
ويعتبر نطاق صدع البحر الميت في منطقتنا العربية والذي يقع في نصف الكرة الشرقي هو المقابل لصدع سان أندرياس في نصف الكرة الغربي . ونلاحظ أن هناك أربع مناطق تراكبت فيها الصدوع المزاخحة أفقياً في

2. الأدلة على حدوث الحركة على امتداد الصدوع

تنتشر الكسور في الصخور ولكن لا يمكن التعرف من النظرة الأولى عما إذا كانت قد حدثت حركة على امتداد هذه الكسور أم لا . بمعنى آخر ، هل هذه الكسور فواصل أم صدوع ؟ . وفي كثير من الأحيان لا يكون من السهل معرفة ما إذا كانت قد حدثت إزاحة أم لا ، كما في حالة ما إذا كان الصخر متجانسا ومتساوي الحبيبات كالجرانيت ، أو إذا كان الصخر مكونا من طبقات رقيقة لا يوجد شيء يميز أيها منها . ومع ذلك ، فإنه قد يكون ممكنا التعرف سطح صدع أو صخر مجاور تماما له تظهر فيه دلائل على حدوث تشوه محلي ، وبالتالي حدوث حركة . وفي بعض الحالات الخاصة الأخرى ، يمكن تعرف اتجاه الحركة النسبية .

وتسبب أحيانا حركة كتل الصخور على جانبي الصدع أن تصبح أسطح الصدع ناعمة ، وبها خدوش أو أخاديد قليلة العمق ، وتسمى الأسطح التي بها خدوش ، والتي تكونت نتيجة الحركة على امتداد الصدع بخدوش الصدع أو بمصقل مسحجي **slickenside** . وتدل الخدوش والأخاديد المتوازية على السطح على اتجاه أحدث حركة حدثت على هذا الصدع (شكل 27.10) . ولا تتكون في كل الصدوع خدوش من الصدع . وفي أحيان كثيرة ، تؤدي حركة الصدع إلى طحن الصخور الموجودة على جانبي سطح الصدع ، وتحوله إلى كتلة من قطع غير متساوية تعرف بـ **breccia** الصدع . وقد تؤدي حركة الصدوع إلى الطحن الشديد لكسرات الصخور لدرجة قد لا يمكن ملاحظتها تحت الميكروسكوب . ومن أوضح الأدلة على الصدع إزاحة جزء من جدة موازية **Sill** أو عرق أو طبقات مميزة بالنسبة لجزء آخر من الصخر أو التركيب نفسه .

امتداد الميل بأنه صدع مائل الانزلاق **oblique-slip fault** (شكل 21.10 هـ) . كما يسمى الصدع الذي تكون حركة أحد جانبيه دورانية على محور متعامد على مستوى الصدع ، حيث تزداد الإزاحة كلما بعدنا عن المحور وعلى امتداد المضرب بمصدع مفصلي **hinge fault** ؛ بمعنى أن الانزلاق يتلاشى في الصدع المفصلي على امتداد المضرب وينتهي عند نقطة محددة (شكل 21.10 و) ، ويعتقد أنه يتكون نتيجة القوى نفسها التي تكون الصدع العادي .



شكل (26.10): صورة لقطاع صدع البحر الميت . لاحظ الصدوع شبه المتوازية والأحواض بين الصدوع .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).



شكل (27.10). خدوش الصدع (مضلل سحجي) slickenside تكونت نتيجة حركة كتل من صخور السربنتين على جانبي الصدع ، حيث تتكون خدوش أو أخاديد قليلة العمق ، جبل الهندسة ، دولة الإمارات العربية المتحدة (د. علي فراج عثمان ، قسم الجيولوجيا - جامعة عين شمس).

3. العلاقة بين الطيات والصدوع

تشويه الطية المضطجعة ، ويشد الطرف المقلوب overturned limb في الطية إلى أن ينكسر في النهاية ويصبح صدع دسر . وقد تصل الحركة على بعض الطيات المضطجعة الكبيرة وصدوع الدسر في جبال الألب إلى ما يزيد عن 50 كم .

٧. تفسير التاريخ الجيولوجي

التاريخ الجيولوجي لمنطقة ما هو تابع لمجموعة من أحداث التشوه والعمليات الجيولوجية الأخرى . فإذا أخذنا منطقة يبدو تاريخها الجيولوجي صعب التفسير ، فإننا نحاول أن نرى كيف أن بعض المفاهيم التي تم معالجتها في هذا الفصل تؤدي إلى تفسير بسيط للتاريخ الجيولوجي لتلك المنطقة . ويوضح (شكل 29.10) مثالا لمنطقة شهدت التتابع التالي للأحداث الجيولوجية:

• ترسبت طبقات رسوبية أفقية فوق صخور القاعدة وتحولت إلى طبقات مائلة . ويمثل السطح بين

لاستمر الطيات والصدوع إلى ما لا نهاية ، بل تميل الصدوع إلى أن تضمحل مثل الطيات ، كما تضمحل الطيات حتى تصبح تمجعدات أصغر فأصغر حتى تنتهي ، كما تضمحل التجمعات وتنتهي في قطعة من القماش .

وعندما يتعرض نوعان من الصخور للإجهادات (الضغط) نفسها ، فإن كان أحد النوعين من مادة قصفة تتشوه بالكسر وتشوه النوع الثاني بالتشوه اللدن ، فإنه تتكون طيات أحادية الميل نتيجة اختلاف طريقة تشوه النوعين . وتنتج معظم الطيات أحادية الميل نتيجة تحرك طبقات لدنة مسطحة فوق صدع ، مما يسبب انحناء هذه الطبقة .

ويلاحظ أن بعض صدوع الدسر الكبيرة في جبال الألب ، ربما بدأت كطيات مضطجعة . وكما يوضح شكل (28.10) فإن زيادة الإجهاد باستمرار تؤدي إلى

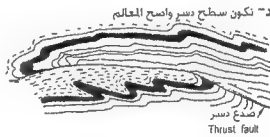
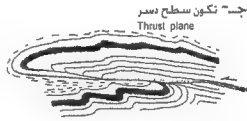
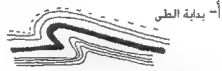
بلاية بازلتية نتيجة انشقاق بركاني حدث نتيجة قوى داخلية في الأرض . ويمثل السطح رقم (3) سطح عدم توافق تبايني يفصل بين الصخور الرسوبية عن صخور الالة البازلتية .

وبالطبع .. فإن الجيولوجي لا يشاهد إلا المرحلة النهائية من هذا التاريخ ، ولكن عليه أن يتخيل كل هذه المراحل ؛ حيث يبدأ الجيولوجي من قاعدة أن الطبقات لابد أنها ترسبت أفقية وغير مشوهة عند قاع محيط قديم ، ثم يقوم بإعادة ترتيب بقية الأحداث .

إن التضاريس التي نراها اليوم ، كذلك التي توجد في جبال الألب وجبال روكي ، وسلاسل المحيط الهادئ والهمالايا ، تكونت نتيجة تشوهات تكتونية حدثت على امتداد عشرات الملايين من السنين . ومازالت تحتفظ هذه السلاسل الجبلية الحديثة بالكثير من المعلومات التي يحتاجها الجيولوجي ؛ ليقوم بجمعها مع بعضها بعضا لتفسير تاريخ هذه التشوهات . أما التشوه الذي حدث منذ مئات الملايين من السنين في سلاسل الجبال القديمة ، مثل جبال البحر الأحمر بالصحراء الشرقية بمصر ، فإن التعرية قد تركت بقايا فقط من الطيات والصدوع في صخور القاعدة **basement rocks** القديمة داخل القسارات (صخور القاعدة هي أقدم الصخور في منطقة ما ، وتمثل تجمعاً من الصخور النارية والمتحولة تعلوه التكوّنات الرسوبية الأحداث ، وعادة ما تكون من صخور ما قبل الكمبري أو الباليوزوي) .

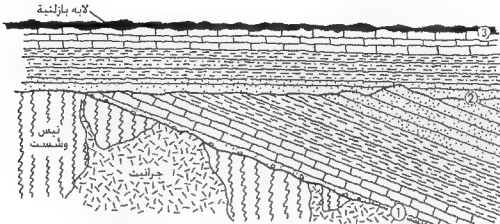
وكما رأينا ، فإن التشوه الذي يؤدي إلى تكون أحزمة جبال ، وما تشمله من تراكيب كالطيات والصدوع ووديان الخسف والصدوع مخرية الانزلاق ، يترك آثاراً لا يمكن إغفالها على تضاريس الأرض ؛ فهذه المعالم الطبوغرافية تكون غالباً أدلة على تراكيب التشوه التي شكلتها . وغالباً ما تتكون أيضاً بعض

صخور القاعدة والصخور الرسوبية سطح عدم توافق رقم (1) .



شكل (28,10): مراحل تكون صدوع الدسر thrust faults من الطيات المضطجة recumbent folds . ويميز هذا النوع من التراكيب جبال الألب والعديد من المناطق الجبلية الأخرى .

- رفعت هذه الطبقات فوق سطح البحر ، حيث تعرضت للتعرية وتكون سطح أفقى جديد يمثل سطح عدم توافق رقم (2) .
- هبطت المنطقة مرة أخرى تحت سطح البحر ، حيث ترسبت طبقات رسوبية أفقية . ويمثل السطح الفاصل بين الصخور الرسوبية المائلة والطبقات الرسوبية الأفقية فوقها سطح عدم توافق رقم (2) .
- رفعت تلك الطبقات مرة أخرى فوق سطح البحر ، حيث تعرضت للتعرية وتغطت الطبقات الرسوبية



شكل (29.10): تتابع الأحداث الجيولوجية التي تؤدي إلى تكوين علاقة عدم التوافق unconformity .

الملخص

1. يمكن أن تتشوه الصخور بطرق ثلاثة هي : التشوه المرن حيث لا يوجد تغير دائم ، أو التشوه اللدن في الطيات ، أو بالكسر في الصدوع والفواصل .

2. يزيد الإجهاد (الضغط) الحابس العالي ودرجات الحرارة العالية صفات اللدونة ، بينما تزيد درجات الحرارة المنخفضة والإجهاد الحابس المنخفض صفات المرونة والتشوه بالكسر حين يتعدى الإجهاد حد المرونة .

3. يحدد المعدل الذي يتشوه عنده الجسم الصلب (الانفعال) نوع التشوه، فبينما تؤدي معدلات الانفعال العالية إلى التشوه بالكسر، فإن معدلات الانفعال المنخفضة تسبب التشوه بالزحف.

4. تميز صفات اللدونة الصخور الأضعف مثل :
الحجر الجيري والرغام والإردواز والفيليت
والشست ، بينما تميز الصخور الأقوى مثل :
الحجر الرملي والكوارتزيت والجرايت بصفات
التقصف . كما تكون الصخور الجافة أقوى من
الصخور الرطبة .

العالم الصغيرة مثل أشكال التلال والوديان ومجاري المياه نتيجة التداخل بين التراكيب تحت السطحية والتجوية.

ومن المهم أن نتذكر أن طوبوغرافية منطقة ما لا تتحدد نتيجة التراكيب فقط . فأيحيانا ، يتكون وادي في وسط طية مقعرة أو مرتفعة عند قمة طية محلبة ، ولكن ليس من الضروري أن نتوقع أن تكون كل هافات التحدبات مرتفعات ، أو أن تكون كل الأجزاء المنخفضة في الطيات المقعرة وديانا . فمن العوامل المهمة في تحديد شكل تضاريس الأرض فوق صحخور منطقة ما مقدار مقاومة الطبقات للتجوية والتعرية ، وما إذا كانت تلك الطبقات مائلة أو مطوية أو متصدعة .

وقد أوضح الاستعراض السابق أن هناك نمطاً في الطريقة التي تشوّه بها الصخور ، والذي يرتبط بالقوى الموجودة في القشرة الأرضية . وتلعب حركة الألواح دوراً مهماً في نشأة هذه القوى . ولقد أصبح واضحاً كيفية فهم وتفسير هذا النمط ، بادئين من تكون الصخور ، ثم إعادة بناء التشوهات اللاحقة والتعرية .

5. يحدد توجيه مستويات التطبيق والصدوع والفواصل أو أية مستويات مائلة أخرى بواسطة المضرب (اتجاه تقاطع المستوى المائل مع المستوى الأفقى) والميل (الزاوية بين المستوى المائل والأفقى).
6. يسبب التشوه اللدن للطبقات تكوّن انثناءات تسمى طيات . ويحدث الطي نتيجة الإجهاد التضاعطي . ويسمى تقوس الطية إلى أعلى تحديداً ، بينما يسمى الطي إلى أسفل تقعرا ، وتسمى الطبقات التي توجد على جانبي الطية بالطرفين .
7. تكون الطيات المقلوبة (يميل كل من طرفي الطية في الاتجاه نفسه) شائعة في سلاسل الجبال المتكونة نتيجة التصادم القارى . وفي بعض السلاسل الجبلية ، فإن طرفي الطية المقلوبة يكونان في وضع أفقى تقريبا ، وتسمى الطية في هذه الحالة بالطية المضطجعة .
8. تعرف الكسور في الصخور التي يحدث عليها انزلاق للكتل الصخرية بالصدوع . وتسبب إجهادات الشد التي تميل إلى جذب القشرة الأرضية من ناحيتين إلى تكوّن الصدوع العادية ، بينما تتكوّن صدوع الدسر والصدوع المعكوسة من الإجهادات التضاغطية التي تؤدي إلى عصر (ضغط) القشرة الأرضية وتقصيرها ، وبالتالي زيادة سمكها . وتنشأ الصدوع مضربية الانزلاق من إجهادات القص أو الضغط ، وهي كسور رأسية تحدث عليها حركة أفقية.
9. يمكن عادة تحديد الحركة النسبية للصخور على جانبي سطح الصدع .
10. تفضمحل الصدوع حتى تصبح طيات ، بينما تنتهي الطيات بأن تصبح على هيئة تجمعات أصغر وأصغر .

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://sepwww.stanford.edu/oldsep/oe/fault_images/BayAreaSanAndreasFault.html
<http://www.prenhall.com/tarbuck>
<http://www.mhhe.com/earthsci/geology/plummer-old/www.mhtml>

المصطلحات المهمة

angle of dip	زاوية الميل	isoclinal fold	طية متفقة الميل
anticline	تحدب (طية محدبة)	joint	فاصل
asymmetrical fold	طية غير متعائلة	limbs of a fold	طرفي الطية
axial plane	مستوى محوري	monocline	طية أحادية الميل (وحد الميل)
axis (of a fold)	محور الطية	normal fault	صدع عادي
basin	حوض	plastic deformation	تشوه لدن
brittle	قصيف	plunge	غطس (الطية)
columnar jointing	فواصل عمودية	plunging fold	طية غاطسة
compressional stress	إجهاد تضاعفي	oblique-slip fault	صدع مائل الانزلاق
confining stress	إجهاد حاسي	offset	فاصلة أفقية
differential stress	إجهاد تفاضلي	open fold	طية مفتوحة
direction of dip	اتجاه ميل	overtumed fold	طية مقلوبة
dome	قبة	recumbent fold	طية مضطجعة
ductile deformation	تشوه لدن	reverse fault	صدع معكوس
elastic deformation	تشوه مرن	rift	خسيف
elastic limit	حد المرونة	rift valley	وادي خسف
fault	صدع	slickenside	خدوش الصدع (مصفل سحجي)
fault breccia	بريشا الصدع	shear stress	إجهاد القص
fold	طية	strain	انفعال
fold axis	محور طية	strike	مضرب
fold belt	حزام طي	strike-slip fault	صدع مضربي الانزلاق
footwall block	حائط سفلي (الصدع)	structural geology	جيولوجيا تركيبية
fracture	كسر	syncline	تقعر (طية مقعرة)
geologic cross section	قطاع عرضي جيولوجي	tectonics	جيولوجيا بنائية (بنائيات)
graben	أخدود	tensional stress	إجهاد الشد
half-graben	نصف أخدود	thrust fault	صدع دسر
hanging wall block	حائط علوي	transform fault	صدع ناقل
hinge fault	صدع مفصلي		
horst	جسر (نتق)		

الأسئلة

1. عرف الإجهاد والانفعال ، وبين العلاقة بينهما .
2. لماذا يمكن طي بعض طبقات الصخور وكسر بعضها الآخر ، عند التعرض لقوى في القشرة الأرضية ؟
3. اذكر التراكيب التي تتكون بالتشوه ، والتي يمكن توقعها عند الأنواع الثلاثة من حدود الألواح التكتونية .
4. اذكر أسماء ثلاثة صخور تشوه بالتشوه اللدن ، وثلاثة أخرى تميل لأن تشوه بالكسر .
5. كيف يمكنك تعرف صدع في الحقل ؟ وكيف يمكنك تحديد ماذا كان الصدع عاديا أو معكوسا ؟
6. ارسم قطاع عرضي لوادى خسف ، ووضح بالأسهم طبيعة القوى التي تسببه . وضح بالطريقة نفسها صدع الدسر .
7. ما القوى الأخرى التي تسبب تشوه الصخور غير قوى القشرة الأرضية ؟
8. وضح الطريقة التي يعمل بها الصدع الناقل ، ولماذا يسمى هذا النوع من الصدوع الناقلة ؟ وضح مثالا لصدع ناقل مازال في حالة نشاط .
9. وضح بالرسم الطية المحدبة وحدد محورها والمستوى المحوري وطرفي الطية .
10. ارسم خريطة جيولوجية لتحدب غاطس ناحية الغرب وحدد المضرب ، واتجاه الميل في عدة أماكن حول الطية . ارسم محور الطية .
11. ما الطية المضطجعة ، وأين يمكن أن نتوقع وجود طيات مضطجعة كبيرة؟ صف الطريقة التي يمكن أن تتحول بها الطية المضطجعة إلى صدع دسر .
12. إذا كان لديك خريطة جيولوجية لا يتوافر معها قطاعات عرضية ، كيف يمكنك التمييز بين طية محدبة وأخرى مقعرة ؟
13. تميز معظم الطيات المحدبة بأن طرفي الطية يميلان للخارج بعيدا عن محور الطية ، اذكر أنواع الطي التي تختلف عن ذلك الوضع .
14. ما المعالم التي يمكن البحث عنها في طبقات الصخور الرسوبية أو البركانية لتحديد ما إذا كان الصخر جزءا من طرف طية مقلوبة أم لا ؟
15. هل تسمى الصدوع التي تحرك صخرًا قديما فوق صخر أحدث بالصدوع العادية أم صدوع دسر أم صدوعا مضربية الانزلاقي؟

١. أسباب تحرك الكتل

أ. طبيعة المواد المكونة للمنحدرات

١. المواد غير المتماسكة

٢. المواد المتماسكة

ب. المحتوى المائى

ج. درجة ميل المنحدرات وعدم استقرارها

د. بادئات (محفزات) التحرك الكتلى

٢. تصنيف عمليات الانهيار الكتلى

أ- انهيار المنحدرات

١. السقوط الصخرى

٢. الانزلاقات

ب. انسيابات الرواسب

١. انسيابات الطين المائع

٢. الانسيابات الحبيبية

ج. الانهيار الكتلى فى المناخات الباردة

١. الانتفاخ الصقيعى والزحف

٢. المناليج الصخرية

د. الانهيار الكتلى تحت الماء

٣. الانهيار الكتلى وتكتونية الألواح

٤. تجنب أو تخفيف آثار الانهيار الكتلى

بلا مأوى ، كما أفسدت المحاصيل وأهلكت الحيوانات
وفي نفس الوقت ، اندلعت النيران في خط أنابيب نفط
الإكوادور والذي يبعد 30 كم شرق كيتو Quito
عاصمة الإكوادور ، نتيجة سقوط جزء من الجبل على
خط الأنابيب . كما لم تستطع السلطات تحديد عدد
الأشخاص المفقودين في المدن المختلفة نتيجة
الفيضانات . وقد حدث مؤخرا في ديسمبر 2005م
انهيار أرضي في إحدى القرى بالقرب من العاصمة
اليمنية صنعاء أسفر عن موت 30 شخصا على الأقل ،
بالإضافة إلى عدد كبير من المفقودين وتدمير عديد من
المنزل (شكل 1.11).

تنقل إلينا وسائل الإعلام بين الحين والآخر أخبار
الانهيارات الأرضية والتدفقات الطينية وآثارها
المدمرة . ومثال ذلك ما حدث يوم 13 نوفمبر 1985م
في كولومبيا بأمريكا الجنوبية ، حيث تسببت تدفقات
الطين في مدينة أرميرو Ammero في موت أكثر من
20000 شخص . كما واقتنا وكالات الأنباء بأنه في يوم
13 يونيو 2001م قتل أكثر من 41 شخصا في انهيار
أرضي ، حيث دفنوا تحت الطين والصخور التي
سقطت من جبل في منطقة نابو Napo بالإكوادور
بأمريكا الجنوبية . ولقد تسببت الانهيارات الأرضية
في تخطيط 400 منزل وخلفت أكثر من 700 شخص



شكل (1.11): الانهيار الأرضي الذي حدث في إحدى القرى بالقرب من العاصمة اليمنية صنعاء في ديسمبر 2005م . (صورة من شبكة المعلومات الدولية - الإنترنت) .

ويشمل الانهيار الكتلى mass wasting كل العمليات التى تتحرك فيها كتل من الصخور أو التربة على المنحدرات تحت تأثير الجاذبية ، لتحملها عوامل النقل لمسافات بعيدة. والانهيار الكتلى أحد نواتج عملية تجوية وتكسر وتفتت الصخور، ويمثل جزءا مهما من عملية التعرية العامة للأرض ، خاصة فى المناطق الجبلية أو التى تحتوى على تلال . وتغير التحركات الكتلية من طوبوغرافية الأرض نتيجة تحرك كتل كبيرة من جوانب الجبال نتيجة السقوط أو الانزلاق بعيدا عن المنحدرات . وتشكل المواد المتحركة فى النهاية ألسنة أو امتدادات من الحطام على قاع الوادى، أو قد تتراكم فى بعض الأحيان لتسد مجرى مائى على امتداد الوادى . وتعتبر رواسب الركام والأماكن الفائرة التى تتركها الكتل المتحركة والتى تعرف بالندبات scars دلائل على حدوث الانهيار الكتلى فى الماضى . ويستخدم الجيولوجيون هذه الشواهد فى التنبؤ والتحذير من حدوث انهيارات كتلية جديدة ، كما يحذرون من القيام بأى نشاطات يكون من شأنها تفعيل هذه التحركات مثل القيام ببعض العمليات والإنشاءات الهندسية.

وستعرض فى هذا الفصل أسباب تحرك الكتل وتصنيفها ، وعلاقة تحرك الكتل بتكتونية الألواح ومحاولات تجنب آثار الانهيار الكتلى .

١. أسباب تحرك الكتل

لقد أوضحت الدراسات الحقلية أن هناك ثلاثة عوامل رئيسية تؤثر على التحركات الكتلية (جدول 1.11) وهى (أ) طبيعة المواد المكونة للمنحدرات ، و(ب) كمية الماء المحتوى فى هذه المواد ، و(3) درجة ميل المنحدرات وعدم استقرارها ، ونعرض فيما يلى لكل من هذه العوامل بالتفصيل .

وفى مصر ، فقد تسببت الانهيارات الأرضية فى تدمير بعض المباني وجزء من الطريق الرئيسى فى الأجزاء الجنوبية والجنوبية الغربية لمدينة المقطم التى تقع فوق الهضبة العليا لجبل المقطم فى شرق القاهرة . كما تسبب انهيار حافة الهضبة العليا لجبل المقطم فى تراجع الحافة فى بعض أجزاء مدينة المقطم بحوالى 55 مترا . وسنناقش أسباب هذا الانهيار بعد دراستنا لأسباب الانهيار الكتلى وتصنيفه .

وكل ما سبق وصفه هو انهيارات أرضية تنتج عن تحرك كتلى mass movement يطلق عليه أيضا الانهيار الكتلى mass wasting ، وهو أحد أنواع تحرك كتل التربة أو الصخور أو الطين أو أى مواد غير متماسكة على المنحدرات تحت تأثير الجاذبية الأرضية . ولا تتحرك هذه الكتل فى الأصل نتيجة تأثير أحد عوامل التعرية ، مثل الرياح أو المياه الجارية أو جليد المثلج ، ولكن يحدث التحرك الكتلى حينما تزيد قوة الجاذبية الأرضية عن قوة تماسك مواد المنحدرات . وتعمل الزلازل والفيضانات أو أى عوامل جيولوجية أخرى على تنشيط هذه التحركات ، حيث تتحرك الكتل حيثتذ إلى أسفل المنحدرات إما بمعدل بطئ (أو بطئ جدا) أو بمعدل تحرك كبير مفاجئ يصل أحيانا إلى حد الكارثة . وقد يسبب التحرك الكتلى إزاحة كميات صغيرة غير محسوسة من التربة إلى أسفل على الجانب اللطيف لتل ، أو قد تسقط أطنان من الكتل الأرضية والصخور إلى قاع الوادى على الجوانب شديدة الانحدار للجبال نتيجة الانزلاق الأرضى . ويحدث التحرك الكتلى نتيجة اشتراك عمليات السقوط أو الانزلاق أو الانسياب أو جميعها معا ، وهو ما سنستعرضه فيما بعد .

جدول (1.11): العوامل التي تسبب تحرك الكتل

طبيعة مواد المنحدر	درجة ميل المنحدر	المحتوى المائي	احتمال الحركة
رمل مفكك أو غرين رمل	زاوية الاستقرار	جاف	مستقر إلا إذا زادت درجة ميل المنحدر عن زاوية الاستقرار بفعل الحفر
		رطب	قد ينساب إذا كان الرمل مشبعاً بالماء
خليط غير متناسك من الرمل والغرين والتربة	متوسطة	جاف	مستقر إلا إذا زادت شدة انحداره
		رطب	عرضة للتدهور، أو الانزلاق أو الانسياب
	حادة	جاف	مستقر مؤقتاً
		رطب	محتمل جداً أن ينزلق أو ينساب
صخر به فواصل أو مشوه	متوسطة إلى حادة	جاف إلى رطب	محتمل حدوث سقوط صخري أو انزلاق
صخر كتلي	متوسطة	جاف إلى رطب	مستقر
	حادة	جاف إلى رطب	محتمل سقوط صخري أو انزلاق

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition, W. H. Freeman and Company, New York).

ملاحظة حركة الرمال الجافة المفككة . فالزاوية المحصورة بين درجة ميل المنحدر في أى كومة من الرمال والمستوى الأفقي تكون ثابتة ، سواء كان ارتفاع كومة الرمل عدة سنتيمترات أو مئات الأمتار . وتبلغ قيمة هذه الزاوية لمعظم الرمال حوالى 35 ° . فإذا جرفنا بعض الرمال من قاعدة الكومة ببطء وحذر زادت زاوية الانحدار قليلا ، ويظل الرمل متناسكا مؤقتا حتى إذا قفز شخص على الأرض بجوار كومة الرمل فبان الرمل يندفع لأسفل على جانب الكومة ، وتسترجع الكومة زاوية الانحدار الأصلية وهى 35 ° . وعلى الرغم من أن الرمال المندفعة تبدو وكأنها تتحرك كوحدة واحدة ، إلا أن معظم الحركة تتم عن طريق تحرك الحبيبات كل على حدة فوق وحول بعضها البعض . ويمكن رؤية حركة الرمال هذه على المنحدرات الشديدة للكثبان الرملية .

وتسمى الزاوية الأصلية والمستعادة لكومة الرمل بزاوية الاستقرار **angle of repose** ، وهى أقصى زاوية مقاسة من الأفقى ، يمكن أن يستقر عندها

أ. طبيعة المواد المكونة للمنحدرات

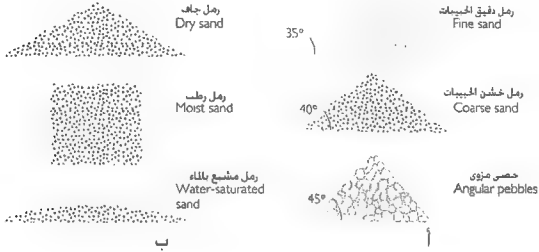
تختلف المواد المكونة للمنحدرات كثيرا من مكان لآخر ، حيث تعتمد على العناصر الجيولوجية المحلية الموجودة في كل منطقة . فقد يكون المنحدر مكونا من كتل صلبة من صخور الأساس **bedrock** أو من حطام صخري (أديم) **regolith** يتكون من مجموعة الصخور المفتتة في موضعها أو المنقولة من موضع آخر والتي تغطي صخور الأساس ، وتشتمل على حطام الصخور والرماد البركاني وتراكبات التربة والبقايا النباتية أو الرواسب . وقد تكون مواد المنحدر متناسكة أو غير متناسكة ، ولكن تكون المنحدرات المكونة من مواد غير متناسكة أقل استقرارا من المنحدرات المكونة من مواد متناسكة .

1. المواد غير المتناسكة

يمكن تعرف الطريقة التى تؤثر بها درجة ميل المنحدرات وعدم استقرارها على التحرك الكتل للمواد غير المتناسكة **unconsolidated materials** من

(شكل 3.11 أ). والتوتر السطحي هو الذى يجعل قطرات الماء مستديرة حتى تنخفض طاقة السطح الكلية ويتبع عن ذلك خفض مساحة السطح الخارجى

انحدار المادة المفككة دون أن تنهار . ويكون الانحدار الأكثر حدة من زاوية الاستقرار انحدارا غير مستقر ويميل لأن ينهار ليصل إلى الزاوية المستقرة .



شكل (2.11): استقرار المواد على المنحدرات

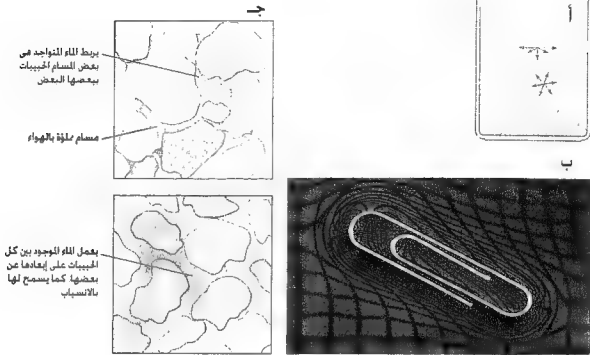
أ) تزيد زاوية الاستقرار angle of repose في كومة من الحبيبات كلما زاد حجم الحبيبات ، وأيضاً كلما كانت الحبيبات ذات حواف أكثر حدة .

ب) تعتمد زاوية الاستقرار على كمية الرطوبة بين الحبيبات ، فالرمال الرطبة ترابط مع بعضها بحيث يمكن أن تكون الجوانب رأسية تقريباً، بينما تنساب الرمال المشبعة بالماء كعذمة رقيقة .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

لقطرات الماء. والتوتر السطحي أيضاً هو الذى يسمح لشفرة حلقة صغيرة أو مشبك معدنى للورق أن يطفو على سطح الماء الهادئ (شكل 3.11 ب). أما إذا وجدت كمية كبيرة من الماء بين الحبيبات فأنها تعمل على إبعاد الحبيبات عن بعضها البعض ، بما يسمح لها بحرية الحركة فوق بعضها البعض . ويتحرك الرمل المشبع بالماء مثل الموائع، وينهار على شكل كعكة مستوية أو عدسة رقيقة ، (شكل 2.11). والتوتر السطحي هو الذى يربط حبيبات الرمل ويسمح لبعض الأشخاص على الشواطئ أن ينشوا قلاعاً من الرمال . ولكن عندما تتشبع هذه الرمال بالماء ، فإن هذه الأشكال تنهار.

وتتغير زاوية الاستقرار بدرجة ملحوظة بسبب عدد من العوامل ، منها حجم وشكل الحبيبات (شكل 2.11). فالحبيبات المفككة الأكبر حجماً والمسطحة الشكل ، والتي يكون لها حواف حادة تبقى مستقرة على المنحدرات الحادة . كما تتغير زاوية الاستقرار أيضاً مع كمية الرطوبة الموجودة بين الحبيبات . فزاوية استقرار الرمال الرطبة تكون أكبر من زاوية استقرار الرمال الجافة ، وذلك يرجع إلى أن الرطوبة القليلة الموجودة بين حبيبات الرمل تعمل على ربطها ببعضها البعض بحيث تقاوم الحركة . ويرجع هذا التماسك بين الحبيبات إلى ظاهرة التوتر السطحي surface tension - قوة الجذب بين الجزيئات عند سطح ما



شكل (3.11): التوتر السطحي surface tension.

أ. تنجذب الجزيئات الموجودة في وسط السائل من جميع الاتجاهات، أما الجزيئات الموجودة عند السطح فتتجذب للداخل فقط، مما يؤدي إلى حدوث ظاهرة التوتر السطحي.

ب. بسبب التوتر السطحي أن يطفو مشبك الورق على سطح الماء، كما لو كان سطح الماء عبارة عن غشاء مرن يمنع المشبك المعدني من السقوط في الماء.

ج. في التربة غير المشبعة بالماء، يعمل التوتر السطحي الناشئ عن وجود غشاء رقيق من الماء يلف الجزيئات على ربطها مما يعمق حركتها. أما عندما تصبح التربة مشبعة، فإن الماء يملأ كل المسافات بين الجزيئات وتصبح الجزيئات متباعدة عن بعضها وتنساب بسهولة.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition, W. H. Freeman and Company, New York).

2. المواد المتناسكة

adhesive. وترتبط حبيبات الرواسب المتناسكة مع

بعضها البعض بروابط تماسكية، مثل الصلصال الكثيف. وعموماً، فإن التماسك هو قوى جذب بين حبيبات مادة صلبة من النوع نفسه تكون قريبة من بعضها البعض. ويوضح شكل (3.11) القوى التماسكية المؤثرة في سائل، أما الالتصاق adhesion فهو قوى جذب بين حبيبات من أنواع مختلفة.

وتسمى مقاومة الحركة الناتجة عن قوى التماسك والتلاصق والتلاحم وتأثير جذور النباتات بالاحتكاك الداخلي internal friction، لأنها تشبه الاحتكاك

لا يكون للمواد المتناسكة consolidated materials الجافة مثل الرواسب المضغوطة والمتلاحمة ببعضها والتربة المزروعة زاوية استقرار كتلك التي تميز المواد المفككة. وقد تكون منحدرات المواد المتناسكة أكثر حدة وأقل انتظاماً، ولكنها تصبح غير مستقرة عندما تزيد زاوية الانحدار أو عندما تزال النباتات منها.

وقوى التجاذب التي تربط بين حبيبات المادة الصلبة الجافة نوعان: تماسكية cohesive ولاصقة

نتيجة لعاملين مهمين هما (1) انخفاض التماسك الطبيعي بين الحبيبات ، و (2) انخفاض الاحتكاك عند قاعدة كتلة الصخر نتيجة زيادة ضغط السائل .

ج. درجة ميل المنحدرات وعدم استقرارها

تؤدي شدة انحدار المنحدرات وعدم استقرارها إلى سهولة سقوط fall وانزلاق sliding وأناسياب flow الكتل الصخرية تحت تأثير الظروف المختلفة . وتراوح درجة ميل المنحدرات بين انحدارات لطيفة نسبيا لطبقات الطفل والرماد البركاني إلى انحدارات حادة لجروف الصخور الصلدة مثل الجرانيت . ويمكن التعبير عن استقرار منحدر ما بالعلاقة بين تلك الإجهادات التي تعمل على أن تغير من استقرار مواد الانحدار وتسبب تحركها ، والقوى التي تعمل على مقاومة تلك الإجهادات الدافعة . وتسمى القوة الدافعة التي تعمل على أن يتحرك جسم ما في اتجاه تماس لمستوى الانحدار بإجهاد القص shear stress .

والعامل الأساسي الذي يؤثر في إجهاد القص هو الشد الجاذبية ، والذي يتأثر بدوره بدرجة ميل المنحدر . حيث تعمل الجاذبية على جذب الأجسام في اتجاه عمودي على السطح الأفقى (شكل 4.11). ويمكن تحليل قوة الجاذبية فوق أى منحدر إلى مركبتين متعامدتين ، إحداها تكون عمودية على اتجاه المنحدر (g_p في شكل 4.11) ، وتعمل على تثبيت الأجسام في أماكنها ، أما المركبة الأخرى فتكون عماسة للجسم وتعمل في خط مواز للمنحدر (g_i) ، وهي التي تسبب تحرك الأجسام في اتجاه ميل المنحدر . وعندما تزداد درجة ميل المنحدر ، فإن المركبة المماسية تزيد عن المركبة العمودية ويصبح إجهاد القص أكبر . أما القوة الثانية التي تعمل على مقاومة تلك القوة الدافعة وتسمى قوة القص shear strength ، فهي المقاومة الداخلية

الذي يقاوم الحركة بين أجزاء المادة . وتكون الحبيبات في المواد ذات الاحتكاك الداخلى العالى غير حرة بنفس درجة تحرك الحبيبات المفككة مثل حبيبات الرمل . وعندما تتحرك هذه المواد ، فإنها تميل إلى أن تتحرك كوحدة واحدة .

ب. المحتوى المائى

تعتمد كمية الماء الموجودة في المواد على درجة مسامية هذه المواد ، وكمية ماء المطر أو أى مياه أخرى تعرضت لها هذه المواد . ويرجع التحرك الكتل للمواد المتناسكة إلى تأثير الرطوبة ، بالإضافة إلى عوامل أخرى مثل زيادة شدة انحدار المنحدرات وإزالة النباتات الموجودة بها ، حيث تصبح التربة غير متناسكة بسبب عدم وجود جذور النباتات وبالتالي تكون عرضة للتأثر بالماء وعدم الاستقرار . وعندما تصبح الأرض مشبعة بالماء ، فإن المادة تصبح زلقة وينخفض بالتالى الاحتكاك الداخلى بها وتستطيع الحبيبات التحرك بسهولة أكبر بالنسبة لبعضها البعض . وقد يتسرب الماء في مستويات التطبيق للرواسب الطينية أو الرملية مثلاً ، ويزيد من معدل انزلاق الطبقات فوق بعضها البعض . ويشبه ذلك الوضع القيادة تحت تأثير المطر الشديد ، حيث تنزلق إطارات السيارات على الطريق مما يفقد السائق التحكم في المركبة . ومما يساعد على زيادة الضغط تحت كتل الصخور المتحركة وجود الهواء المختلط مع الرواسب ، مما يقلل أيضاً من عملية الاحتكاك .

وعندما تكتسب المواد المتناسكة كميات كبيرة من الماء ، فإن ضغط الماء في مسام المادة يكون كبيراً بدرجة تكفى لفصل الحبيبات وتنفخ الكتلة ، وتبدأ المادة حيثشذ في الانسياب مثل المواد المائعة .

وهكذا يمكن وصف تأثير الماء على تحرك الصخور والرواسب على المنحدرات تحت تأثير الجاذبية ، بأنه

ضعف محتملة ، لأن الطبقات المتجاورة تختلف في تركيبها المعدني والنسيج أو في قابليتها لامتصاص الماء . فمثل هذه الطبقات قد تصبح غير مستقرة ، حيث تنزلق كتل الصخور على امتداد أسطح التطبيق الضعيفة .

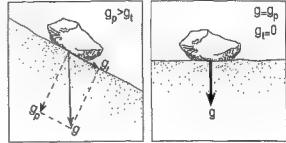
وتؤثر كل العوامل الثلاثة السابقة وأيضا النشاط البشرى أثناء عمليات حفر وإنشاء المباني ومد الطرق في استقرار المنحدرات ، حيث تعمل على تقليل مقاومة الكتل الصخرية للتحرك ، مما يساعد قوة الجاذبية على جذب الكتل فتسقط وتنزلق على المنحدرات .

د. بادئات (محفزات) التحرك الكتل

إذا توافرت في منطقة ما العوامل المؤدية إلى عدم استقرار المنحدرات (المسود المكونة للمنحدر، والرطوبة، ووحدة زاوية الانحدار) فإنه لا يمكن تجنب حدوث انزلاق للصخور ، وكل ما يحتاجه الأمر عندئذ هو وجود عامل منشط لبدء الحركة ، حيث يمكن أن تسبب عاصفة مطيرة شديدة بدء انزلاق أو فيضان الركاب . وفيما يلي استعراض سريع للعوامل التي تعمل على بدء التحرك الكتل :

1. التقوض undercutting هو إزالة المواد من قاعدة جرف أو منحدر شديد الميل أو وجه صخري مكشوف . وقد يحدث ذلك بفعل البشر خلال أعمال الإنشاءات الهندسية على الطرق وخلافه ، أو بفعل عوامل طبيعية مثل تعرية الماء الساقط أو الجارى أو حركة الأمواج على الشاطئ .
2. زيادة الحمل overloading على المنحدر (مثل إنشاء البنى) بحيث لا يستطيع تحمل الوزن المضاف ، ولذلك فإنه ينزلق أو ينساب .
3. الذبذبات من الزلازل أو التفجيرات في بعض المحاجر (مثل منطقة المقطم شرق القاهرة) مما يؤدي

للجسم لمثل هذا التحرك . ويتحكم في قوة القص عدة عوامل موجودة في مادة الصخر أو الحطام الصخري . وتشمل هذه العوامل مقاومة الاحتكاك والتماسك بين الحبيبات والتماسك بفعل جذور النباتات .



شكل (4.11): تأثير الجاذبية الأرضية على صخر موجود فوق منحدر تلى . تعمل الجاذبية رأسياً ويمكن تحليلها إلى مركبتين ، إحداها تكون عمودية على اتجاه سطح المنحدر (g_p) ، والأخرى مماسية لسطح المنحدر (g_t) .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وعندما تكون قوة القص أكبر من إجهاد القص ، فإن الصخر أو الغطاء الصخري لا يتحرك . وتحدث الحركة بالطبع عندما تزيد القوة الدافعة (إجهاد القص) عن قوة المقاومة (قوة القص) . ويمثل هذه العلاقة أيضاً ما يعرف باسم عامل الأمان safety factor للانحدار ، ويعبر عنه بالنسبة التالية: معامل الأمان F_s = قوة القص + إجهاد القص .

وعندما تكون قوة القص shear strength أكبر بدرجة ملحوظة من إجهاد القص shear stress يوصف المنحدر بأنه مستقر (معدل أكبر من 1.3) ولا تحدث بالتالى أى تحركات . وعندما يزيد إجهاد القص عن قوة القص (معدل أقل من 1) فمن المفترض حدوث حركة على المنحدر في توقيت قريب ، ويوصف المنحدر حينئذ بأنه غير مستقر .

وبالإضافة لما سبق ، فإن تركيب الطبقات يؤثر على استقرارها ، خاصة حينها يكون ميل الطبقات موازياً لزاوية ميل الإنحدار . فقد تكون أسطح التطبيق نقاط

الانهيار الكتل التى تتراوح بين تلك التى يحفز فيها الماء عملية الانسياب إلى تلك التى لا يلعب فيها الماء دوراً مباشراً أو مهماً.

ويمكن تقسيم عمليات الانهيار الكتل إلى مجموعتين رئيسيتين (شكل 5.11) هما :

* انهيار المنحدرات **slope failure** ، وينتج عن الانهيار المفاجئ للمنحدر مما يؤدي إلى نقل كتل متماسكة نسبياً من الصخر أو الحطام الصخري إلى أسفل على المنحدرات بالسقوط **falling** أو الانزلاق **sliding** . وهناك نوعان من الانزلاق أولهما الانزلاق الانتقالي **transitional slide** ، حيث تتحرك الكتلة الهابطة على أسطح مستوية تقريباً ومائلة ، وثانيهما الانزلاق الدوراني **rotational side** ويسمى أيضاً التدهور **slump** ، وهو يشمل الحركة على أسطح منحنية ، حيث يتحرك الجزء العلوي للكتلة المنزلقة إلى أسفل ويتحرك الجزء السفلى إلى أعلى .

* انسيابات الرواسب **sediment flows** وهو انسياب مغاليط من الرواسب والماء والهواء إلى أسفل المنحدرات بسبب الحركة الداخلية لكتل الحطام الصخري . وتتأثر تلك العملية بنسبة الراسب في المخلوط المناسب وسرعة الانزلاق .

ومنستعرض فيما يلى هذين النوعين من الانهيار الكتل ، كما سيتم أيضاً استعراض سريع لبعض عمليات ورواسب الانهيار الكتل في مناطق المناخ البارد وعلى قيعان المحيطات .

أ. انهيار المنحدرات

تعمل الجاذبية الأرضية على انهيار جروف الجبال ومنحدرات التلال باستمرار . وحين يحدث الانهيار فإن الركام الصخري ينتقل لأسفل على المنحدرات وينشأ

إلى كسر الروابط التى تربط مكونات المنحدر في مكانها .

4. إضافة الماء ، حيث تكون إضافة الماء موسمية غالباً ، وهذا هو السبب في أن بعض الأوجه الصخرية المقطوعة حديثاً تبقى حتى سقوط الأمطار في الموسم التالى . ويؤثر الماء بطريقتين : إما بإضافة الحمل على المنحدر ، أو بتقليل التماسك الداخلى بين المكونات . والتأثير الرئيسى للماء هو ملء الفراغات بين الحبيبات ، وعند زيادتها فإن الماء الإضافى يملأ كل الفراغات بين الحبيبات بحيث ينعدم تأثير التوتر السطحي الذى يربط الحبيبات مع بعضها البعض . كما أن إضافة الماء إلى بعض معادن الصلصال التى توجد في بعض أنواع التربة يزيد من حجمها . ولذلك فإن إضافة الماء إلى منحدرات مكونة من هذا النوع من الصلصال المتفخخ يؤدي إلى تنشيط الانهيارات الأرضية .

II. تصنيف عمليات الانهيار الكتل

تشارك كل عمليات الانهيار الكتل في صفة واحدة مميزة وهى حدوثها على المنحدرات . ويعرف أى تحرك محسوس لكتلة من صخور الأساس أو من الحطام الصخري (الآديم) أو من مخلوط منها معاً لأسفل على أسطح المنحدرات بالانزلاق الأرضي **landslide** .

ويمكن التعرف أنوع مختلفة من الحركة على المنحدرات ، ولكن لأنها غالباً ما تتداخل مع بعضها البعض ، فإنه لا يوجد تصنيف بسيط ونموذجي لتلك العمليات . فكما ذكرنا ، فإن تركيب ونسيج الراسب المكون للمنحدر وكمية الماء والهواء المختلطة مع الرواسب وزاوية ميل المنحدر ، تؤثر جميعاً على نوع وسرعة الحركة . ويلاحظ أن هناك تدرجاً في قوة الانهيارات تتراوح بين انسياب مجرى مائي إلى مجرى مائي آخر يحمل بالرواسب ، إلى مجموعة عمليات

الانزلاق مستوية تقريبا ومائلة ، مثل أسطح التطبيق أو أسطح الصدوع أو الفواصل . ويسمى الانزلاق انزلاقا انتقاليا ، أما إذا كانت أسطح الانزلاق مقعرة سُمى الانزلاق انزلاقا دورانيا ، ويعرف أيضا بالتدهور .

الانزلاقات الانتقالية **translational slides**: ويشمل نوعين من الانزلاق (شكل 5.11 ب) هما الانزلاق الصخري **rockslide** وهو عبارة عن الحركة المفاجئة لكتلة صخرية منزوعة من الطبقات على المنحدرات ، وانزلاق الحطام **debris slide** وهو انزلاق الحطام الصخري على أسطح المنحدرات . ويكثر الانزلاق الصخري وانزلاق الحطام في المناطق الجبلية المرتفعة حيث تنشر الانحدارات الحادة . وعندما تحدث انهيارات صخرية ضخمة ، فإن الراسب الناتج يتكون عموما من خليط غير منظم من كتل صخرية مخلوطة بجلايد يصل قطرها أحيانا إلى عدة أمتار .

وتتجمع الكسرات الصخرية المزواة هو منظر شائع عند سقوط الجروف الحادة . ويتراوح عادة حجم الحطام الصخري بين حجم الرمل والجلايد الكبيرة . ويسمى هذا الجسم من الحطام المنحدر للخارج عند أسفل الجروف والمنحدرات شديدة الميل بالركام **talus** .

ويمثل انهيار المنحدرات الجنوبية والجنوبية الغربية للهضبة العليا الجبل المقطم مثالا على الانزلاقات الانتقالية والسقوط الصخري (شكل 6.11 أ) . وتكون الهضبة العليا للمقطم من حجر جيري يتبع الإيوسين العلوي ، ويتولى على حفريات كبيرة وكثير من الفجوات الصغيرة ، بالإضافة إلى طبقات من حجر الطين تحتوي على معدني المونيمورلينييت والكاولينيت ، وتقع مباشرة تحت صخور أساس **bedrock** مدينة المقطم . وقد حدث انهيار المنحدر في

منحدر ثابت جديد . وتعمل الزلازل والمجاري المائية والأمطار الغزيرة المستمرة وانثاقات البراكين على تنشيط عملية الانهيار . كما ترتبط الانهيارات المتلاحقة بالترسيب السريع للرواسب وزيادة حدة انحدار المنحدر والصدمات الزلزالية . وتعرض فيما يلي لأنواع انهيار المنحدرات **slope failure** .

1. السقوط الصخري

السقوط الصخري **rockfall** هو سقوط حر في الهواء لكتلة من صخر الأساس أو من الحطام الصخري من جرف أو منحدر حاد (شكل 15.11) . ويكون سقوط الصخور شائعا في المناطق الجبلية شديدة الانحدار ، حيث يكوّن الحطام الصخري رواسب واضحة عند سفوح المنحدرات الحادة . وعندما يسقط الصخر بحرية ، فإن سرعته تزداد كلما زادت مسافة السقوط .

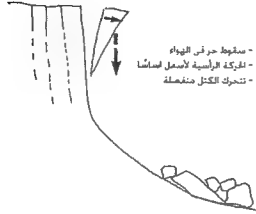
وقد يتضمن سقوط الصخور نزع وسقوط كسرة صخرية واحدة أو قد يتضمن انهيارا مفاجئا لكتلة ضخمة من الصخور التي تندفع من ماثات الأمتار لتكتسب سرعة عالية وتتكسر عند الاصطدام بالأرض إلى عدد ضخم من القطع الأصغر التي تتجمع في النهاية وتتوقف عند أسفل المنحدر . وعند حدوث انهيار صخري من جبل ، فإن هذا الانهيار لا يشمل الصخور فقط ولكن يشمل أيضا ما يعلوه من رواسب ونباتات .

ويكون سقوط الحطام **debris fall** مائلا لسقوط الصخور ، ولكنه يتكون من خليط من الصخور والحطام الصخري بالإضافة إلى النباتات .

2. الانزلاقات

الانزلاقات الأرضية **landslides** هي تحركات على سطح أو أكثر من أسطح الانهيار . وتكون أسطح

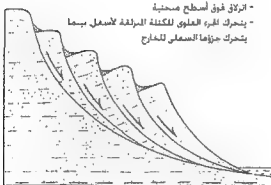
أ- السقوط Falls



- سقوط حركى الهواء
- الحركة الرأسية لأسفل أساساً
- تتحرك الكتلة منفصلة

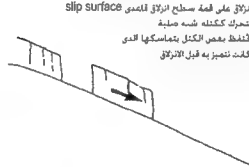
ب- الانزلاقات الأرضية Landslides

2- انزلاق دوراني Rotational slide



- انزلاق فوق أسطح منحنية
- يتحرك الجزء العلوي للكتلة المرفرفة لأسفل بينما
- يتحرك حيزها السفلي للخارج

1- انزلاق انتقالي Transitional slide



- انزلاق على قمة سطح انزلاق للصدى slip surface
- تتحرك كتلته شبه صلبة
- تحتفظ بعض الكتلة بتماسكها لدى
- كذلك تتميز به قبل الانزلاق

شكل (5.11): تصنيف عمليات انزلاق المنحدرات .

(أ) السقوط falls وهو يشمل السقوط الصخري rockfall وسقوط الحطام debris fall.

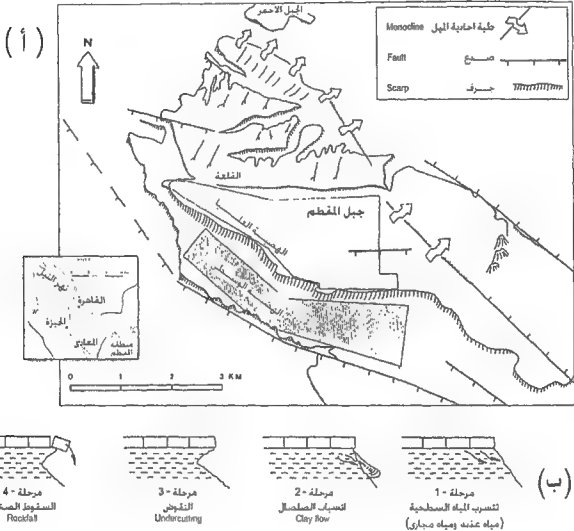
(ب) الانزلاقات الأرضية landslides ، ويشمل

(1) الانزلاق الانتقالي transitional slide حين تتحرك الكتلة المحاطة على امتداد أسطح مستوية ومائلة .

(2) الانزلاق الدوراني rotational slide (التدهور slump) حين تتحرك الكتلة المحاطة على امتداد أسطح منحنية .

(Compiled from: Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters, 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston, and: Holmes, D.L., 1984: Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson, Great Britain).

تلك المناطق بسبب الانزلاق الانتقالي لكتل كبيرة نزلت من الهضبة العليا ، ولوجود فواصل رأسية تسرب فيها المياه العذبة ومياه مجارى مدينة المقطم ، والتي تعمل على انتفاخ طبقات حجر الطين (شكل 6.11 ب). وفيه تتحرك الصخور أو الحطام الصخرى لأسفل وللخارج في حركة دورانية على سطح انزلاق يأخذ شكلا مقعرا لأعلى مثل الملعقة (شكل 5.11 ب). وتعمل عادة قمة الكتلة المنزلة للخلف لتكون منحدرًا معاكسًا . وقد يكون التدهور



شكل (6.11): انهيار المنحدرات الجنوبية والجنوبية الغربية للهضبة العليا لجبل المقطم .

(أ) خريطة تضاريسية لجبل المقطم

(ب) رسم تخطيطي يوضح مراحل انهيار حافة الهضبة العليا للمقطم وتراجعها ، حيث تغلغل الماء في الرواسب الطينية على امتداد مستويات التطبيق مما زاد في معدل الانزلاق الطبقات فوق بعضها ، كما أدت شدة انحدار الصخور إلى عدم استقرار حافة الهضبة العليا للمقطم .

(After Moustafa, A. R. and Abdel Tawab, S., 1985: Morphostructures and non-tectonic structures of Gebel Mokattam. Mid. East Res. Center, Ain Shams Univ., Egypt, Sci. Ser. 5).

(After Moustafa, A. R., El-Nahas, F. and Abdel Tawab, S., 1991: Engineering geology of Mokattam City and vicinity, eastern Greater Cairo, Egypt. Eng. Geology, Vol. 31).

حيثذ بالانسياب الكتلى mass flow . ويمكن اعتبار هذين النوعين من انسيابات الرواسب أنها يمثلان طرفى سلسلة متصلة من الانسيابات . ويحدد تركيز الرواسب وميكانيكية الانسياب نوع الانسياب الذى قد يحدث تحت ظروف معينة . وقد تغير ميكانيكية انسياب ما خلال تقدمه . ومن المعروف أن معظم الكتل الضخمة من الرواسب التى تتحرك تحت تأثير الجاذبية الأرضية ، تتحرك بأكثر من ميكانيكية واحدة .

وتعتمد الطريقة التى تنساب بها الرواسب فى درجات حرارة أعلى من درجات التجمد على: (1) نسبة المواد الصلبة والماء والهواء و(2) الخصائص الفيزيائية والكيميائية للرواسب . ويوضح (شكل 7.11) تقسيم انسيابات الرواسب إلى مجموعتين اعتمادا على نسبة الراسب وهما (1) انسياب الطين المائع slurry flow وهو كتلة متحركة من راسب مشبع بالماء ، و(2) انسياب حبيسى granular flow وهو خليط من الراسب والهواء والماء ، ولكن على خلاف انسياب الطين المائع فإنه يكون غير مشبع بالماء ، حيث يعتمد وزن الراسب المنساب بالكامل على تلامس الحبيبات ببعضها البعض أو التصادم بين الحبيبات . وتشمل كلتا مجموعتى الانسياب السابقتين عدة أقسام بناء على سرعة انسياب الرواسب ، فالزحف creep وهو نوع من الانسياب الحبيسى البطئ جدا ، ويقاس بالمليمترات أو السنتيمترات كل عام ، بينما يقاس هيار الحطام debris avalanche بالمليمترات فى الساعة . وفى هذا التصنيف للانسيابات الرسوبية ، فإن الحدود الموضوعية بين هذه العمليات تقريبية فقط وتعتمد على توزيع حجم الحبيبات وتركيز الراسب وعوامل أخرى . وفيما يلى وصف لأنواع الانسيابات الرسوبية .

مفردا أو فى مجموعات ، كما تتراوح التدهورات فى الحجم بين إزاحات صغيرة تبلغ مترا أو مترين إلى تدهورات كبيرة معقدة تغطى مئات أو حتى آلاف الأمتار المربعة .

ويحدث عديد من التدهورات نتيجة لتعديل الشكل الهندسى لطوبوغرافية بعض المناطق أو أثناء إنشاء الطرق السريعة التى تسير بمحاذاة منحدرات الجبال . كما تلاحظ على جوانب الأنهار وشواطئ البحار حيث تعمل التيارات والأمواج على تقويض قاعدة المنحدر .

ب. انسيابات الرواسب

تعرف انسيابات الرواسب sediment flows بأنها تحرك كتلى يشبه تحرك السوائل . وتتكون المواد المنسابة من كتل كبيرة متماسكة فى حجم الجلاميد ، كما قد تكون فى حجم حبيبات الرمل أو الصلصال ، كما قد تتكون من خليط من كل تلك المواد . وتتفاوت كمية الماء فيها ، حيث تكون جافة أو رطبة أو مبتلة . وتتكون المواد المنسابة من مخاليط كثيفة من الرواسب والماء (أو من الراسب والماء والهواء) ، حيث يكون الانسياب معتمدا على الراسب فى حركته ، ولا يحدث انسياب فى حالة عدم وجود راسب . وقد تكون الانسيابات حبيبية أى تكون الحركة تحت ظروف جافة تقريبا . والخاصية العامة التى تشترك فيها كل تلك الانسيابات أن حبيبات الرواسب تتحرك جميعا تحت تأثير الجاذبية الأرضية . ففى حالة الانسيابات الحبيبية تعمل الحبيبات مثل الموائع نتيجة للضغط الناشئ عن تفاعل الحبيبات .

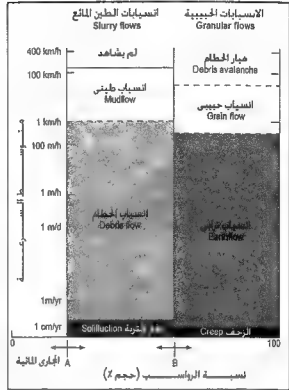
ويمكن تصنيف انسيابات الرواسب بناء على الطريقة التى تتحرك بها إلى: انسيابات موائع fluidal flows أو انسيابات مواد لدنة ، حيث يعرف الانسياب

هذه الحركة في المناطق التي يزيد ارتفاعها عن خط الثلج الدائم ، حيث يتجمد الحطام الصخري القريب من السطح بصفة دائمة ، وقد يمتد التجمد إلى أعماق تصل إلى 400 متر ، ويطلق عليه اسم الصقيع الدائم permafrost ، وتعلوه طبقة رقيقة ينصهر فيها الجليد في الصيف ويتجمد في الشتاء ، وعند انصهار الجليد في الصيف تصبح هذه الطبقة السطحية مشبعة بالماء الذي لا يتسرب منها إلى أسفل لوجود الجمد الدائم تحته ، ويؤدي ذلك إلى عدم استقرار هذه الطبقة السطحية وانسيابها أو زحفها في اتجاه ميل السطح (شكل 7.11).

انسياب الحطام: يشمل انسياب الحطام debris flow تحرك حطام صخري غير متماسك إلى أسفل المنحدرات ، حيث يكون حجم معظم الحبيبات أكبر من حجم الرمل ، وتحرك بسرعات تتراوح بين متر واحد فقط في العام إلى أكثر من كيلومتر واحد في الساعة . وفي بعض الأحيان ، يبدأ انسياب الحطام بتدهور أو انزلاق الحطام ، ثم يستمر الجزء السفلي منه في الانسياب لأسفل المنحدرات (شكل 8.11). ويمجرد بدء انسياب الحطام ، فإنه يتحرك على امتداد مجرى مائي ثم ينتشر على سطح مروحة طمية حيث يتماسك كراسب رديء الفرز .

ويكون لرواسب انسياب الحطام مقدمة على شكل لسان ، كما يكون سطحها غير منتظم بالمرّة ، مع وجود مرتفعات صغيرة (حيود) ومنخفضات متحدة المركز. ويصاحب انسيابات الحطام عادة فترات سقوط أمطار شديدة للغاية ، مما يؤدي إلى أن تصبح الأرض مشبعة بالماء بدرجة كبيرة .

انسياب طيني: يعرف انسياب الحطام الذي يكون محتواه من الماء يكفي لزيادة ميوته بدرجة عالية بانسياب طيني mudflow — بمعنى أن مصطلح



شكل (7.11): تقسيم الانسيابات الراسب اعتمادا على نسبة الرواسب وسرعتها . ويحدث الانتقال من مجرى مائي يحمل بالرواسب إلى انسياب الطين المائع عندما تصبح نسبة الرواسب عالية للدرجة أن الجرى المائي لا يمثل عامل نقل ، وإنما تصبح الجاذبية الأرضية هي القوة الأولى التي تعمل على انسياب الرواسب المشبعة بالماء . وعندما تقل نسبة الماء ، يحدث انتقال من انسياب طين مائع إلى انسياب حبيبي ، حيث يحتوي الراسب حيثئذ على الماء أو الهواء . وتحدد الأنواع المختلفة من انسيابات الطين المائع أو الانسيابات الحبيبية اعتمادا على متوسط السرعة .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

1. انسيابات الطين المائع (الرذغة)

يكون خليط الراسب في انسيابات الطين المائع كثيفا إلى درجة أن الجلاميد الكبيرة قد تصبح معلقة فيها ، وتنساب بالانحدرة ، وعندما يتوقف الانسياب تبقى الحبيبات الناعمة والخشنة مختلطة ببعضها .

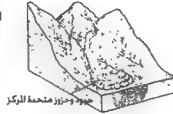
دفع التربة: تعرف الحركة البطيئة جدا للتربة والحطام الصخري (الأديم) regolith المشبع بالماء أسفل المنحدرات بدفع التربة solifluction وتحدث

انسيابات الرواسب Sediment flows

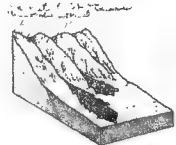
انسيابات الطين المائع (رطبة) Slurry flows



دفع التربة
Solifluction

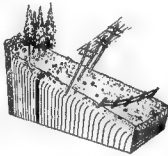


انسياب الحطام
Debris flow

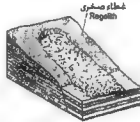


انسياب طيني
Mudflow

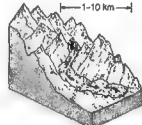
الانسيابات الحبيبية (جافة) Granular flows



الزحف
Creep



انسياب ترابي
Earthflow



انسياب الحطام
Debris avalanche

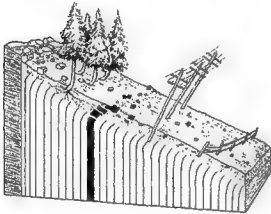
شكل (8.11): انسيابات الرواسب وأمثلة على الانسيابات الحبيبية وانسيابات الطين المائع .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وإذا فحصنا رواسب الانسياب الطيني ، فنجد أن محتواها يتراوح بين خليط غليظ القوام مثل الأسمنت حديث الصب إلى خليط رقيق القوام أكثف قليلا من الماء المحتوى على كثير من الطين . فبعد سقوط الأمطار بغزارة على أخدود خائق في منطقة جبلية ، فإن الانسياب الطيني يبدأ على هيئة مجرى مائي طيني يستمر في النقاط الرواسب المفككة حتى تصبح مقدمته مثل سد متحرك من الطين والدبش rubble ، وتعتمد إلى

الانسياب الطيني مرادف لانسياب حطام سريع الحركة . ويوضح (شكل 7.11) أن مدى سرعة الانسياب الطيني يقع عند الحد الأعلى لمدى سرعة انسياب الحطام (أكثر من 1 كيلو متر في الساعة تقريباً). وعموما فإن معظم الانسيابات الطينية تكون سريعة الحركة وتميل لأن تتحرك بسرعة على امتداد قاع الوادى (شكل 8.11) .

أعلى على المنحدرات الحادة أكثر منها على المنحدرات اللطيفة . وهناك عديد من الأسباب التي تؤدي إلى الزحف، مثل تكون الجليد وذوبانه مما يسبب ارتفاع وهبوط الحبيبات (شكل 10.11) ، وكذلك قد يتغير حجم حبيبات المعدن بسبب ارتفاع وانخفاض درجات الحرارة دون أن يحدث تجمد . كما يؤثر النشاط الحيواني في عملية الزحف ، حيث تعمل الديدان والحشرات والحيوانات الزاحفة الأخرى على إزاحة الحبيبات ، كما تفعل الحيوانات على سطح الأرض حالياً . وكذلك عندما تذوب بعض المعادن في الماء ، فإنها تترك فراغات في صخر الأساس ، حيث يكون هناك ميل لأن تملأ بالمواد من أعلى المنحدرات .



شكل (9.11): شكل لمنحدر يوضح تأثير الزحف creep ، حيث تتحرك التربة ببطء . وقد تشوهت الطبقات المائلة بشدة بالقرب من سطح الأرض بحيث تبدو كما لو أنها طويت ، كم مالت أعمدة الهاتف وتأثر السور وانحنت جذوع الأشجار نتيجة للزحف .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters, 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

وتسمى الرواسب غير المتماسكة والتي تتحرك أساساً نتيجة الزحف على المنحدرات بالـ كولوفيوم (رسوبيات مترakمة) colluvium . وتميل الحبيبات في هذه الرواسب لأن تكون مزواة وينقصها الفرز sorting الواضح . وتساعد هذه الصفات عموماً في التمييز بين الكولوفيوم والرواسب المتكونة بواسطة

جانبى الرادى ومندفعا بقوة الماء المنساب وراءه . وعند الوصول إلى منطقة مفتوحة عند مقدمة الجبل ، فإن السد المتحرك ينهار ويصب الماء وينساب فوق السد المنهار وحوله ، ويتنشر الطين المختلط بالجلاميد على هيئة فريشة رقيقة تأخذ أحيانا شكل المروحة .

وفي المناطق ذات المناخ الرطب ، حيث تغطي جوانب البراكين النشطة شديدة الانحدار بطبقات التيفرا (الفتات الناري pyroclasts غير المتماسك المتكون من مواد صلبة بركانية من اللابة الحية نفسها ، بالإضافة إلى البركانيات السابقة الخروج) والخطام البركاني ، في أعقاب سقوط أمطار أو ذوبان جليد تندفع هذه المكونات على هيئة انسياب طيني من حطام بركاني غير متماسك يحتوى على الماء ، وتعرف باللاهـار lahar وهي كلمة معربة من الإندونيسية، ومن أمثلة ذلك ما سبق أن أوضحناه في أرميرو بكولومبيا.

2. الانسيابات الحبيبية

تكون الرواسب في الانسيابات الحبيبية جافة إلى حد كبير، مع وجود هواء يملأ الفراغات ، كما قد تكون مشبعة بالماء ولكن يسمح حجم الحبيبات وشكلها للماء بالهروب بسهولة .

الزحف والكولوفيوم: إن أبسطاً تحرك كتل هو المعروف بالزحف creep ، حيث تحدث حركة بطيئة غير محسوسة للغطاء الصخري لأسفل التلال بمعدل يتراوح بين 1 مم إلى 10 سم تقريبا في السنة ؛ تبعا لنوع التربة والمناخ وشدة الانحدار وكثافة النباتات الموجودة به . ويحدث الزحف عموماً بمعدلات بطيئة جدا لدرجة لا يمكن ملاحظتها ، إذ إن القياسات الدقيقة لإزاحة الأجسام على المنحدرات مثل أعمدة الهاتف والأشجار تسجل هذه المعدلات البطيئة (شكل 9.11) . وكما هو متوقع فإن معدلات الزحف تكون

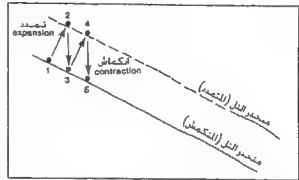
ويأخذ الانسياب الترابى شكل اللسان الطويل الضيق ، وتكون له مقدمة مستديرة ومتفخخة . وتراوح الانسيابات الترابية بين عدة أمتار طولا وعرضا ، وأقل من متر واحد عمقا ، إلى أكثر من عدة مئات من الأمتار عرضا ، وأكثر من 1 كم طولا ، وأكثر من 10 متر عمقا .

الانسياب الجببى : إذا مشى شخص على قمة أحد الكتلان الرملية واقترب جدا من المنحدر الحاد الذى يقع فى الناحية الدائرية لاتجاه الريح ، فإن خطوة هذا الشخص تكون قد تسببت فى بدء سقوط حبيبات الرمل مناسبة أسفل وجه الكتلان الرمل . ويشرح هذا المثال ، أحد أنواع الانهيار الكتلانى والمعروف بالانسياب الجببى granular flow والتي تشمل تحرك راسب جاف أو شبه جاف مكون من حبيبات مع وجود هواء يملأ الفراغات المسامية بينها . ويحدث مثل هذا الانسياب الجببى طبيعياً ، عندما تكوّن حبيبات الرمل المتراكمة انحدارا يزيد عن زاوية الاستقرار ، مما يؤدي إلى حدوث انهيار . وتتصادم الحبيبات المتحركة خلال عملية الانسياب بكثرة . ويتراوح معدل سرعات الراسب المتحرك نموذجياً بين 0.1 إلى 35 متر فى الثانية .

هيارات الحطام : يكون هيار الحطام debris avalanche الضخم والمتحرك بسرعة حدثا نادرا ومثريا . ويتحرك هذا النوع من الانسياب الجببى بسرعة عالية ، وقد يكون شديد التدمير (شكل 8.11) . وكثيرا ما يتضمن هيار الحطام كتلا ضخمة من الصخر المتساقط والحطام الذى يتكسر ويسحق عند ارتطامه ، ثم يستمر فى الحركة أسفل المنحدرات لمسافات كبيرة غالبا .

ويكون لسقوط الصخور الضخمة والذى يؤدي لحدوث هيارات الحطام أكبر تأثير على الإنسان فى المناطق الجبلية المأهولة بالسكان مثل جبال الألب

المياه المنسابة أو الهواء ، والتي تتكون عادة من حبيبات مستديرة وترسبت فى طبقات قد تم فرزها .



شكل (10.11): رسم توضيحي لآلية حدوث الزحف creep ، نتيجة لدورة التجمد - الانصهار freeze-thaw cycle . تتحرك الحبيبات لأسفل على المنحدرات نتيجة لتبادل عمليتي تجمد وذوبان الجليد على الأرض . فعندما يحدث التجمد ، ترتفع الحبيبة عن سطح الأرض (من نقطة 1 إلى نقطة 2) ، وعندما يذوب الجليد تتحرك الحبيبة رأسيا تقريبا لأسفل نتيجة تأثير الجاذبية (من نقطة 2 إلى نقطة 3) ، مما يؤدي إلى تحرك الحبيبة لمسافة قصيرة ، ولكنها هامة ، أسفل المنحدرات .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

الانسيابات الترابية: الانسياب الترابى earthflow هو أحد معالم الانهيار الكتلانى الشائعة وخاصة فى المناطق الجبلية ، وهو انسياب جببى تتراوح سرعته بين متر واحد فى اليوم إلى عدة مئات من الأمتار فى الساعة (شكل 7.11) . وقد تبقى الانسيابات الترابية نشيطة لعدة أيام أو شهور أو حتى سنوات . وقد تكون عرضة للتحرك مرة أخرى بعد توقف الحركة لبعض الوقت . وتتكون الانسيابات الترابية عموما ، مثل انسيابات الحطام ، من غطاء صخري فى حجم حبيبات الغرين أو الصلصال تم تجويته ، ويحدث على منحدرات تتراوح بين اللطيفة والمتوسطة (2° إلى 35°) . وتحدث الانسيابات الترابية حينما تكون الأرض مشبعة بالماء ، على فترات متقطعة على الأقل . وعموما تصاحب الانسيابات الترابية فترات من سقوط الأمطار الشديدة .

ج. الانهيالات الكتل في المناخات الباردة

ينشط الانهيالات الكتل بصورة ملحوظة عند الارتفاعات العالية فوق خط الثلج الدائم وفي المناطق شديدة البرودة عند خطوط العرض العالية. وفي هذه المناطق يغطي الثلج معظم صفحة الأرض طوال العام بأرضية متجمدة ويكون تأثير الصقيع مهما كعملية جيولوجية.

1. الانتفاخ الصقيعي والزحف

عندما يتجمد الماء يزداد حجمه ويدفع الجليد الموجود في الغطاء الصخري المشبع بالماء سطح الأرض إلى أعلى. ويسمى رفع الغطاء الصخري لأعلى نتيجة لتجمد الماء بالانتفاخ الصقيعي **frost heaving**. ويؤثر الانتفاخ الصقيعي كثيرا على زحف الرواسب إلى أسفل المنحدرات في المناخات الباردة. وعند حدوث التجمد يرتفع سطح الأرض في اتجاه عمودي على المنحدر. وعند ذوبان الجليد، تميل كل حبة من الرواسب لأن تسقط رأسيا لأسفل تحت تأثير الجاذبية. وهكذا تكون حركة الحبيبة النهائية خلال كل دورة من التجمد والانصهار، لمسافة قصيرة جدا لأسفل على المنحدر (شكل 10.11). والنتيجة النهائية لهذه الدورات المتكررة من التجمد والانصهار هي الزحف **creep** ولكن ببطء لأسفل على المنحدرات.

2. المثالج الصخرية

تعتبر الثلجة الصخرية **rock glacier** إحدى المعالم المميزة للعديد من المناطق الجبلية الجافة. وهي عبارة عن لسان من حطام صخري ردىء الفرز ملتحم بالجليد، يتحرك ببطء لأسفل على المنحدرات بطريقة مشابهة للمثالج. وتشأ المثالج الصخرية عموما أسفل الجروف الحادة والشديدة الانحدار والتي تعتبر مصدرا للحطام الصخري. وقد يصل سمك الثلجة الصخرية النشطة حوالي 50 مترا أو أكثر، وقد تتحرك بمعدلات

والأنديز. فلقد حدث في سبتمبر عام 1717 م أن سقطت كتلة ضخمة من الصخر والجليد على مثلجة تريولييه **Triolet Glacier** من قمة جبل قرب مون بلان **Mont Blanc** على امتداد الحدود الإيطالية الفرنسية، مما أدى إلى طحنها عند الاصطدام. ولقد تحرك الحطام المتكسر بسرعة لأسفل وعلى امتداد الوادى لمسافة 7 كم قبل أن توقف مقدمته، وعلى ارتفاع أقل 1860 مترا من مكان انفصال تلك الكتلة. وقد قدرت سرعة الكتلة عند الاصطدام بحوالى 320 كم في الساعة. وعند اصطدام كتلة الحطام بأرض الوادى الرئيسى، فإن القوة الدافعة حملتها إلى أعلى جدار للوادى المقابل إلى ارتفاع بلغ 60 مترا على الأقل. وقد غمر الحطام عند هذه النقطة قريتين صغيرتين بالجبل وقتل كل السكان والدواب، حيث قدرت سرعة الهيار بحوالى 125 كم / ساعة على الأقل. وقد استغرق الزمن الكلى لرحلة الهيار على امتداد السبع كيلو مترات بين دقيقتين وأربع دقائق. ومن الواضح من زمن هذه الحركة السريعة أن النجاة من هيارات الحطام الكبيرة والمدمرة تكون نادرة الحدوث.

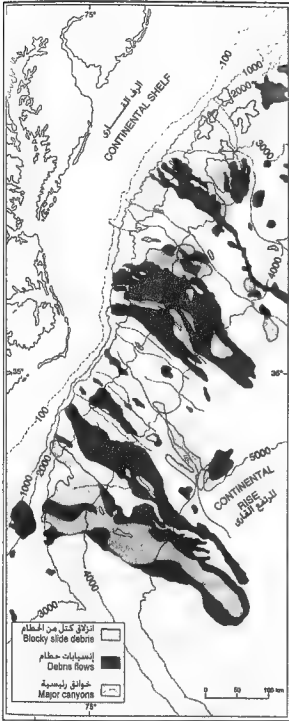
وحيث إن هيارات الحطام الكبيرة نادرة الحدوث ومن الصعب دراستها أثناء الحركة، فتكون نتائج ملاحظتها قليلة. وتعزى الحركة الشديدة السرعة إلى أن الحطام كان يعلو طبقة من الهواء المضغوط. فإذا كانت هذه الملحوظة صحيحة، فإن هيارات الحطام تتحرك مثل المركبات التي تجرى على اليابس أو الماء فوق هواء مضغوط يخرج من مروحة كبيرة. وقد يقلل الهواء المضغوط بين الحطام المتحرك من الاحتكاك بين الجزيئات ويسبب أن تتصرف الكتلة مثل مادة عالية الميوعة. وتعرض جوانب البراكين الطباقية غير المستقرة للانزلاق مما يؤدى إلى حدوث هيارات حطام.

تصل إلى حوالي خمسة أمتار في العام . وتكون المشالج الصخرية شائعة عموما في سلاسل الجبال المرتفعة مثل جبال الألب والأنديز .

د. الانهيار الكتلي تحت الماء

امتد البحث عن النفط إلى الرفوف والمنحدرات القارية . وقد أوضحت عمليات الاستكشاف البترولي أن الانهيار الكتلي تحت الماء subaqueous mass wasting شائع إلى أبعد الحدود ، وأنه أحد العوامل المهمة لنقل الرواسب على قاع المحيط ، كما اكتشف أيضا وجود انهيار كتلي في البحيرات . وكما هو الوضع على اليابس ، فإن الصخور والرواسب تتحرك تحت تأثير الجاذبية كلما كان هناك منحدرات تحت مائية . وتؤدي انهيارات المنحدرات تحت الماء إلى تكون تيارات كثيفة تنساب في أعماق البحار ، وتتحرك تحت تأثير الجاذبية ، وتعرف بتيارات العكر turbidity currents . وتيارات العكر هي نوع من انسياب الرسوبيات تحت الماء ، حيث تتحرك الرواسب في الوديان العميقة ذات الجوانب شديدة الانحدار والمعروفة بالأخاديد الخانقة canyons تحت البحرية ، حيث تتكون رواسب العكر على مناطق المرتفع القاري continental rise . كما قد يتسبب الانهيار الكتلي تحت الماء في تكون جزء أساسي من رواسب الرف القاري continental shelf خاصة في المناطق القريبة من الأنهار الكبيرة .

وقد أظهرت الدراسات الحديثة للمحيط الأطلنطي شرق أمريكا الشمالية ، أن مساحات واسعة من قاع المحيط قد تعرضت لتدهورات وانزلاقات وانسيابات تحت بحرية (شكل 11.11) . وقد غطت بعض الانزلاقات الكبيرة مساحات تبلغ أكثر من 40000 كم² ، وتصل إلى أعماق تزيد عن 5400 متر . وتؤثر الانزلاقات عموما في الخمسين مترا العليا من رواسب قاع المحيط .



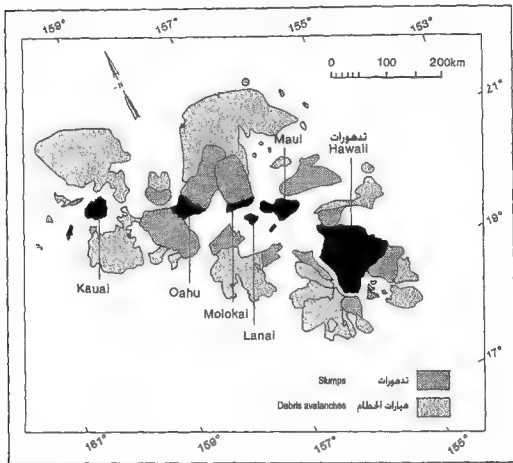
شكل (11.11): خريطة للمنطقة الشرقية من الولايات المتحدة الأمريكية توضح توزيع الانزلاقات الأرضية ورواسب انسياب الحطام على المنحدر والمرتفع القاري continental slope and rise للمحيط الأطلنطي .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

III. الانبيال الكنتلي وتكونية الألواح

يوضح إسقاط الانبيارات الأرضية الكبيرة في العالم على خريطة الكرة الأرضية ، أن معظمها يتركز في أحزمة تقع بالقرب من حدود الألواح المتقاربة . ويرجع ذلك إلى سببين :

كما تتكون في الدلتاوات البحرية الكبيرة عدة مظاهر سطحية ورواسب ترجع إلى انبيارات المنحدرات. ففي مثل هذه البيئات تحت المانية قد يحدث الانبيار على منحدرات لطيفة جدا (في حدود 1°) ، ومن أمثلة ذلك دلتا المسيسيبي . وعموما فإن الانزلاقات وانسيابات الرواسب تكون نشيطة للغاية عند مقدمة الدلتا .



شكل (12.11): تغطي جزر هاواي (موضحة باللون الأسود) مساحة أقل من المساحات التي يشغلها تدهورات وهبارات الحطام الساحقة منها .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters, 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

1. تقع أعلى سلاسل الجبال في العالم عند حدود الألواح المتقاربة أو بالقرب منها ، حيث تتميز هذه الجبال بالمنحدرات الحادة ، مثل جبال الأنديز بأمريكا الجنوبية . وتتكون معظم صخور هذه السلاسل الجبلية من طبقات بها عديد من الفواصل

وتظهر طوبوغرافية الحواف السفلية المغمورة لبراكين هاواي (شكل 12.11) ، حدوث انبيارات أرضية ضخمة متكررة على جوانب البراكين ، وتشمل انسيابات وانزلاقات للركام على هيئة كتل .

التي تحدث نتيجة النشاط الإنسانى . وتشمل الطرق الرئيسية لإعادة الاستقرار إلى بعض المناطق المعرضة للانزلاقات الأرضية : (1) تجنب الإنشاءات فى المناطق المعرضة للتحركات الأرضية ، (2) تجنب إنشاء الجسور (الكبارى) فوق المناطق غير المستقرة ، (3) صرف المياه أو ضخها من الرواسب المشبعة بالمياه على المنحدرات المعرضة للزحف ، (4) إنشاء حوايط حاجزة أو تراكيب مائلة مع مراعاة ألا تقوم هذه الحوايط بحجز الماء أيضاً ، (5) محاولة تعديل زاوية الانحدار وجعلها مساوية لزاوية الاستقرار الطبيعية ، (6) يمكن أحياناً حقن الأسمنت أو استخدام النسف بالمتفجرات لجعل المنحدرات أكثر استقراراً.

الملخص

1. يسبب الانهيار الكتل تحرك الحطام الصخرى تحت تأثير الجاذبية دون وسط نقل. ويحدث الانهيار الكتل على اليابس وتحت الماء.
2. تؤثر كل من طبيعة وتركيب الحطام وكمية الماء والهواء المختلط به ودرجة ميل المنحدر على نوع وسرعة التحركات على المنحدرات .
3. تشمل عمليات الانهيار الكتل انهيار المنحدر المفاجئ مثلثة بالتدهور والسقوط والانزلاق، وكذلك انسياب غلايط من الرواسب والماء والهواء لأسفل المنحدرات .
4. تحدث الانهيارات حينما يصل إجهاد القص (القوة الدافعة) أو يزيد عن قوة القص (قوة المقاومة) لمواد المنحدر . ويقلل ضغط الماء العالى فى منحدرات الصخر أو الراسب من قوة القص ويزيد من احتمالية الانهيار.

والتي تكسرت بشدة وتشوهت أثناء رفعها ، بحيث تكون كل من أسطح الفواصل وأسطح التطبيق نطاقات محتملة للانزهار . وبالإضافة إلى ذلك ، تقع على امتداد الحدود المقاربة وعلى امتداد هذه الأحزمة أعلى البراكين الطباقية فى العالم ، والتي تميل منحدراتها بزوايا حادة ، حيث يتواجد الرماد البركانى الذى تنشأ عنه الانسيابات الطينية بسهولة.

2. تحدث أيضاً على امتداد هذه الألواح المقاربة زلازل كبيرة ، حيث تتزلق حدود الألواح بالنسبة لبعضها البعض فى نطاقات الاندساس ، كما تنشأ أيضاً الزلازل مصاحبة للمصهارات المتحركة لأعلى التى تغذى الانبثاقات البركانية على سطح الأرض .

وقد تصاحب التحركات الكتلية أيضاً الألواح المتباعدة ، خاصة عند المنحدرات الحادة المتكونة فى وديان الحسب القارية والتى تصاحب بدء عملية التباعد . وقد حدثت انهيارات تحت بحرية فى وادى الخسف فى حيد وسط المحيط الأطلنطى ، وهو موضع لتباعد الألواح أيضاً . كما أن حدود الصدع الناقل ، مثل صدع سان أندرياس ، هى أيضاً مواقع لتحركات كتلية متكررة ، حيث تنشأ المنحدرات الحادة على امتداد الصدع ويكثر حدوث الزلازل . وعند مقارنة الظروف السابقة مع المناطق البعيدة عن حدود الألواح سواء الحالية أو السابقة ، حيث تكون الطبوغرافية منخفضة نسبياً ، فإن تشوه الصخور يكون أقل نسبياً وتكون المنحدرات الطبيعية والزلازل نادرة .

IV. تجنب أو تخفيف آثار الانهيار الكتل

قد تكون بعض التحركات الكتلية كبيرة أو لا يمكن تجنبها ، ولذلك يجب أن نتعلم كيف نتعايش معها ونتجنب آثارها أو منعها خاصة الصغير منها أو

5. يتضمن التدهور حركة دورانية على سطح انزلاق مقعر لأعلى؛ مما يؤدي في حدوث ميل للخلف لكتل الصخر أو الغلاف الصخري.
6. يشيع سقوط وانزلاق كتل الصخر والحطام في الجبال حيث يتشعر وجود المنحدرات الحادة.
7. يتراكم حطام سقوط الصخور عند قاعدة الجرف ليكون ركاما يتجمع عند زاوية الاستقرار.
8. تشمل انسيابات الطين المائع كتلا كثيفة متحركة من راسب مشبع بالماء وتكون عند توقف الانسياب غير مفروزة . وتتراوح سرعة الانسياب بين سرعة بطيئة جدا (دفع التربة) إلى سرعة عالية (انسيابات الحطام).
9. في الانسيابات الحبيبية توجد حدود تلامس بين الحبيبات المكونة للراسب أو تصادم الحبيبات باستمرار. وقد يكون الراسب جافاً إلى درجة كبيرة
- أو قد يكون مشبعاً بالماء ولكن يسمح النسيج بهروب الماء بسهولة .
10. على الرغم من أن الزحف يكون بطيئاً للدرجة غير محسوسة؛ إلا أنه واسع الانتشار ومهم في نقل كميات من الحطام لأسفل المنحدرات .
11. تكون هيارات الحطام الكبيرة وسريعة الحركة نادرة ولكن تسبب كوارث للإنسانية .
12. في المناطق التي تكون الأرض فيها متجمدة طول السنة، يكون الانتفاخ بفعل الصقيع والزحف هما أهم عمليات الانهياالك الكتل.
13. هناك أدلة على انتشار عمليات التدهور والانزلاق والانسياب على المنحدرات القارية على مساحات واسعة من قاع المحيط .
14. يمكن تخفيف آثار الانهيارات الكتلية أو منعها بالتخطيط والتقييم الدقيق المبني على دراسات جيولوجية لمناطق سابقة .

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

<http://anaheim-landslide.com/>
http://www.seis.utah.edu/NEHRP_HTM/perseq.htm
<http://landslides.usgs.gov/>
<http://landslides.usgs.gov/slumtrip/slumtrip.htm>

المصطلحات المهمة

angle of repose	زاوية الاستقرار	rockfall	سقوط صخرى
colluvium	كولوفيوم (رسوبيات متراكمة)	rock glacier	مثلجة صخرية
consolidated materials	مواد متماسكة	rockslide	انزلاق صخرى
creep	زحف	rock avalanche	هيار صخرى
debris avalanche	هُيار الحطام	sediment flows	انسيابات الراسب
debris fall	سقوط الحطام	shear strength	قوة القص
debris flow	انسياب الحطام	shear stress	إجهاد القص
debris slide	انزلاق الحطام	slump	تدهور
earthflow	انسياب ترابى	slurry flow	انسياب الطين المائع
frost heaving	انتفاخ بفعل الصقيع	solifluction	دفق التربة
granular flow	انسياب حبيبي	surface tension	توتر سطحي
lahar	لاهار (انسياب الطين البركاني)	talus	ركام
landslide	انزلاق أرضى	turbidites	رواسب العكر
mass movement	تحرك كتلى	turbidity currents	تيارات العكر
mass wasting	انهيار كتلى	unconsolidated materials	مواد غير متماسكة (مفككة)
mudflow	انسياب طيني		

الأسئلة

- 1- ما دور الزلازل في حدوث الانهيارات الأرضية ؟ 7 - اذكر الفرق بين كل من السقوط الصخري والانهيار
- 2- اذكر كيف يختلف الانهيار الكتل عن التجوية وعن الصخري.
- 8- كيف تثبت أن هناك زحفا يحدث على المنحدر التعرية بواسطة المجارى المائية.
- 3- اذكر كيف ينشط وجود الماء في الصخر أو الخطام وكيف يمكن قياس سرعته؟
- 9- ما السبب في أن هيار الركام الكبير واللاهارة الصخري (الأديسم) الحركة لأسفل على المنحدرات.
- 10- (انسياب الطين البركاني) تكون عموماً أخطر
- 4- ما الفرق بين الانزلاق والانسياب ؟
- 5- ما أنواع التحركات الكتلية التي تتم بسرعة بحيث لا يستطيع الشخص تجنبها؟
- 10- كيف يمكن أن تؤثر الأمطار الغزيرة والمستمرة على قوة القص لجسم من الغلاف الصخري وتجعله عرضة للانهيار ؟
- 6- كيف تؤثر شدة الانحدار على الانهيار الكتل؟
- 11- ما الانسياب الطيني ، وكيف يمكن أن يتكون ؟

أولاً: الانسيابات وخزانات المياه

أ. دورة الماء

أ. كمية الماء المستخدم

ثانياً: الأنهار والنقل إلى المحيطات

أ. المعالم الرئيسية للنظام النهري

أ. نظام التجميع

ب. نظام النقل

ج. نظام التوزيع (الانتشار)

أ. انسياب الماء في مجارى المياه الطبيعية

أ. التصريف

ب. السرعة التي يتحرك بها الماء

ج. شكل وحجم قناة المجرى المائى

د. انحدار قناة المجرى المائى

هـ. مستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية)

و. الحمولة

أ. أشكال القنوات النهرية

أ. القنوات المستقيمة

ب. القنوات المتعطفة

ج. القنوات المجدولة أو المضفرة

أ. التعرية بالمجارى المائية

أ. البرى

ب. التجوية الكيميائية والطبيعية

ج. التقويض الناشئ عن تأثير التيار

V. حولة المجارى المائية

أ. حولة القاع

ب. الحمولة المعلقة

ج. الحمولة الذائبة

د. التغير في حجم الحبيبات وتركيب الرواسب في

اتجاه مصب النهر

VI. رواسب المجارى المائية

أ. السهول الفيضية والجسور الطبيعية

ب. الشرفات (المصاطب النهرية)

ج. المراوح الطمية (الفيضية)

د. الدلتاوات

VII. أنظمة الصرف

أ. أحواض الصرف وخطوط تقسيم المياه

ب. أنماط الصرف

ج. أنماط الصرف والتاريخ الجيولوجى

VIII. نهر النيل بمصر

أ. نشأة وتطور نهر النيل

ب. تطور دلتا النيل

نستخدم الماء ، دون أن نعرض تلك الإمدادات المستقبلية للخطر .

أولا : الانسيابات وخزانات المياه

نشاهد الماء الجارى وهو يتنقل من مكان لآخر فوق سطح الأرض عبر الأنهار ، كما يوجد مخزون من الماء على سطح الأرض في البحيرات والمحيطات . ولكن من الصعب رؤية الكميات الضخمة من المياه المخزونة في الغلاف الجوى للأرض ، أو تلك التي توجد تحت الأرض . كما يصعب أيضا مشاهدة الانسيابات داخل تلك الخزانات أو خارجها . فعندما يتبخر الماء ، فإنه ينحني عن النظر على هيئة بخار في الغلاف الجوى . وعندما يغوص ماء المطر في باطن الأرض ، فإنه يصبح ماءً جوفيا groundwater ، وهو كتلة من الماء المخزون تحت سطح الأرض ، ويسمى أيضاً ماء تحت أرضي underground water .

وتسمى كل البيئات التي يخزن فيها الماء مخزانات reservoirs . ويطلق مصطلح خزان على مصدر الماء أو مكان تواجده . ومن المواضع الطبيعية الرئيسية لتخزين الماء البحار والمحيطات والمثلج glaciers القطبي والبحيرات والأنهار والغلاف الجوى والغلاف الحيوى . ويوضح شكل (1،12) توزيع الماء بين تلك الخزانات . وتشمل الخزانات الأرضية البحيرات والأنهار والمياه الجوفية ، بينما تعتبر المحيطات أكبر خزانات الماء على الأرض . وعلى الرغم من أن كمية الماء الكلية في الأنهار والبحيرات صغيرة نسبياً ، إلا أن هذه الخزانات مهمة للإنسان ، لأنها تحتوي على الماء الطبيعي الجاهز للاستخدام . وتبلغ كمية المياه الجوفية

يقوم الجيولوجيون المتخصصون في علم المياه بدراسة حركة المياه وخصائصها ، سواء الموجودة على سطح الأرض أو المخزونة بداخلها . ويعتبر الماء الجارى في الأنهار ، وأيضا المتجمد في جليد المثلج عامل رئيسي في التعرية التي تساعد في تشكيل صفحة الأرض على القارات . كما أن الماء عامل أساسي في التجوية ، حيث يعمل كعامل إذابة ونقل للمعادن الموجودة في الصخور والتربة . كما يتسرب الماء في صخور القشرة الأرضية ويكوّن خزانات مائية ضخمة . ويسبب الماء أيضاً كثيراً من الانزلاقات الأرضية وغيرها من صور التحرك الكتل ، وتتكون رواسب الحامات الحمائية hydrothermal ore deposits نتيجة دوران الماء الساخن فوق الأجسام النارية وفي حيود وسط المحيط mid-ocean ridges .

والماء عامل حيوى وأساسى لكل صور الحياة على الأرض . ولا يستطيع الإنسان البقاء على قيد الحياة لأكثر من عدة أيام دون ماء . وحتى النباتات والحيوانات الصحراوية تحتاج إلى الماء . وكمية الماء التي تحتاجها المدينة الحديثة أكبر بكثير مما تحتاجه المتطلبات البسيطة للحياة ؛ فالماء يستخدم بكميات ضخمة في الصناعة والزراعة واحتياجات المدن .

وقد أصبح علم المياه (الهيدرولوجيا) hydrology أكثر أهمية الآن ، حيث يتزايد الطلب على الماء رغم الكميات المحدودة المتاحة منه . ولكي نحصى هذه الإمدادات فلا بد أن نفهم ليس فقط أين يمكن أن يتواجد الماء ؟ ولكن كيف يمكن أن نجد مصادر وإمدادات المياه . ويمكننا في ضوء هذه المعلومات أن

التحول بين الحالات الثلاثة للمادة وهي السائل (الماء) والغاز (بخار الماء) والصلب (الجليد)، وذلك تحت تأثير درجات الحرارة الموجودة فوق سطح الأرض. وتؤدي هذه التحولات إلى بعض الانسيابات الرئيسية من خزان إلى آخر في دورة الماء. وتقوم حرارة الشمس بدور القوة المحركة في دورة الماء، حيث تعمل على تبخير الماء من المحيطات، ثم تساعد في نقله كبخار ماء إلى الغلاف الجوي. ويتكثف بخار الماء تحت ظروف مناسبة من الحرارة والرطوبة إلى قطرات من الماء البالغة الصغر تكوّن السحب، ثم تسقط في النهاية كأمطار أو جليد فوق المحيطات والقارات. ويتخلل بعض الماء السدى يسقط على اليابسة إلى الأرض بالتسرب **infiltration**، وهي العملية التي يدخل فيها الماء إلى الصخر أو التربة عبر الشقوق أو بعض المسام الصغيرة الموجودة بين الحبيبات. ويتبخر بعض الماء الجوفى من سطح التربة، بينما تمتص جذور النباتات جزءاً آخر وتحمله إلى الأوراق لتعود إلى الغلاف الجوي أثناء عملية النتح (حرق النبات) **transpiration** وهو خروج بخار الماء من النبات. وقد يعود بعض الماء الجوفى إلى السطح من خلال الينابيع.

ويجري ماء المطر الذي لا يتسرب في الأرض فوق سطح الأرض ليتجمع تدريجياً في المجارى المائية والأنهار. وتسمى كمية ماء المطر التي تجري وتنساب فوق سطح الأرض بالجريان السطحي **runoff**. وقد يتسرب بعض ماء الصرف السطحي في الأرض أو يتبخر من الأنهار والبحيرات، ولكن ينساب معظم ماء الصرف السطحي إلى البحار والمحيطات.

وقد يتحول الثلج المتساقط إلى جليد في المشالج، والتي تعيد بدورها الماء إلى المحيطات بالانصهار والجريان السطحي، أو إلى الغلاف الجوي بالتسامي **sublimation** وهو التحول من الحالة الصلبة (جليد)

مائية ضعف كمية المياه الموجودة في الأنهار والبحيرات، إلا أن الكثير منها لا يستخدم نظراً لأن مياهها تحتوي على كميات كبيرة من المواد الذائبة.

ويتدفق الماء إلى الخزانات من عدة مصادر منها الأمطار والأنهار، كما يتدفق ويُفقد الماء من هذه الخزانات بطرق عديدة مثل التبخر. وحيث إن هناك حركة دائمة للمياه من وإلى الخزانات، فإذا تساوت كمية الماء المتدفق إلى الخزانات مع كمية الماء الخارج منها فإن حجم الخزان يبقى ثابتاً، على الرغم من أن الماء يدخل ويخرج باستمرار.

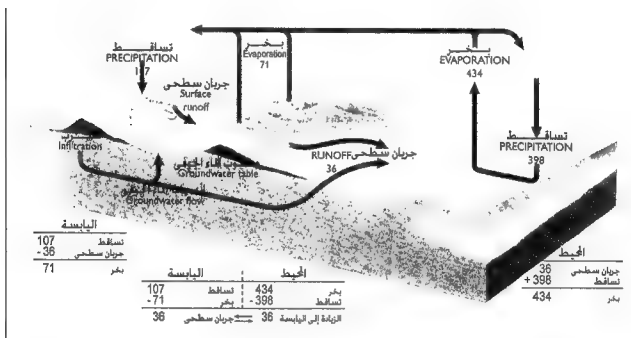
وتبلغ كمية الماء الكلية التي يتم إمداد العالم بها حوالي 1.46 بليون كيلومتر مكعب، وهي كمية ضخمة تتوزع بين الخزانات المختلفة. وهذه الكمية من الماء ثابتة على الرغم من أن معدل انسياب الماء من خزان لآخر قد يتغير من يوم لآخر ومن عام إلى عام ومن قرن إلى قرن. ولا يوجد على امتداد هذه الفترات الزمنية القصيرة أى إمداد أو فقد للماء الموجود في باطن الأرض، كما لا يوجد أى فقد ملحوظ للماء من الغلاف الجوي إلى الفضاء الخارجى للأرض.

أ. دورة الماء

يتحرك الماء فوق سطح الأرض أو تحتها، أو يدور بين الخزانات الرئيسية على الأرض وهي المحيطات والغلاف الجوى واليابسة. ويسمى الدوران المستمر والدائم للماء من المحيط إلى الغلاف الجوى، ومن الأمطار إلى سطح اليابسة، ومن الصرف السطحي **runoff** للماء والمياه الجوفية إلى المجارى المائية (الأنهار أساساً)، ثم مرة أخرى إلى المحيط بدورة الماء **hydrologic cycle**. ويوضح شكل (1.12) وصفاً مبسطاً لهذه الدورة الدائمة والمستمرة للماء بالإضافة إلى الماء المتحرك. ويتميز الماء بقدرته على

والتساقط ، وبينما يفقد الكمية نفسها بالبحر . وبالتالي تبقى كمية الماء في كل خزان ثابتة تقريبا . كما يوضح شكل (1.12) ، أن الماء المتبخر من المحيطات أكبر من الماء المتساقط عليها كأمطار . ويتم موازنة هذا الفقد من الماء الذي يعود إلى المحيطات نتيجة الصرف السطحي من القارات . ويأتي حوالي ثلث الماء الكلي المتساقط على اليابسة (107.000 كم³) نتيجة البخر الزائد عن كمية الماء المتساقط على المحيطات (434.000 -

مباشرة إلى الحالة الغازية (بخار الماء) . ويعود جزء كبير من الماء الذي يتبخر من المحيطات إليها كماء مطر أو ثلج أو جليد . وتساقط بقية الماء فوق اليابسة حيث يتبخر أو يعود إلى المحيطات كجريان سطحي . وتعرف عملية سقوط الماء على الأرض (محيطات ويابسة) من الغلاف الجوي في صورة أمطار أو ثلج بالتساقط precipitation ، وتقاس بيا يقابلها من ماء سائل دون اعتبار لصورة سقوطه .



شكل (1.12): دورة الماء The hydrologic cycle

توازن حركة الماء في الغلاف الجوي نتيجة البخر من المحيطات والقارات بالتساقط في صورة أمطار وثلج . ويتوازن بخار الماء من المحيطات مع الصرف السطحي surface runoff من القارات وتساقط الأمطار فوق المحيطات . وتوضح الأرقام أسفل الرسم كيف يتوازن انسياب الماء من المحيطات واليابسة والغلاف الجوي مع بعضها البعض . الأرقام الموضحة بالآلاف الكيلومترات المكعبة كل سنة .

ويوضح شكل (1.12) كيف تتوازن الخزانات مع بعضها البعض نتيجة الانسيابات الكلية في النظام الأرضي الحالي والذي يتأثر بالنشاط الإنساني . فمثلاً ، يحصل سطح اليابسة على الماء نتيجة التساقط ، وتفقد كمية الماء نفسها نتيجة التبخر والصرف السطحي . ويحصل المحيط على الماء من الصرف السطحي

ويعود هذا الثلث بدوره إلى المحيطات كصرف سطحي .

II. كمية الماء المستخدم

تتحكم دورة الماء بشكل أساسي في إمدادات الماء في العالم . ومعظم الماء الذي نستخدمه هو ماء عذب تقريباً . وتأتي إمدادات الماء العذب الطبيعي فقط عن طريق الأمطار والأنهار والبحيرات وبعض المياه

ثانياً: الأنهار والنقل إلى المحيطات

تعتبر الأنهار من العوامل الجيولوجية الرئيسية التي تعمل على سطح الأرض، حيث تقوم المجارى المائية من مختلف الأحجام مثل الجداول الصغيرة والأنهار الرئيسية بتعرية الصخور الأساس ونقل وترسيب الرمل والحصى والطين. وستناول هنا العمل الجيولوجي للأنهار، أى كيف تساب المياه في تيارات وكيف تحمل هذه التيارات الراسب، وكيف تقوم المجارى المائية بتكسير وتعرية الصخور الصلبة، وكيف تحفر المجارى المائية الوديان وتكون عدة أشكال أثناء حركة المياه.

ونحن نستخدم في حياتنا اليومية بعض المصطلحات لوصف المجارى المائية المختلفة، إلا أن الجيولوجيين يضعون مفاهيم أكثر دقة لبعض هذه المصطلحات. ولذلك يستخدم الجيولوجيون كلمة مجرى مائي **stream** لأى فرع يحتوى على ماء مناسب، سواء كان كبيراً أم صغيراً، بينما يستخدمون كلمة نهر **river** للأنهار الرئيسية المتفرعة من مجرى مائي كبير.

وتلعب المجارى المائية دوراً مهماً في حياتنا، فهي تحترق معظم مدن العالم، وتستخدم للملاحة ونقل البضائع والأفراد، كما تستخدم كمصدر للمياه للتجمعات السكنية والصناعية. فأنهار الأمازون والراين والميسيسي والنيل تستخدم كشريان حيوى للنقل. وقد بنيت معظم المدن الكبرى في العالم مثل القاهرة والخرطوم ولندن وباريس وروما وموسكو في وديان مجارى مائية. ويختار الناس أن يعيشوا بالقرب من مجارى الأنهار، حيث يسهل البناء على قيعان الأودية المستوية، كما تكون التربة خصبة والماء متوافراً. فقد قامت الزراعة حول نهر النيل منذ الفراعنة حتى اليوم. كما تكون الحياة بالقرب من الأنهار محاطة بالمخاطر، حينما تفيض الأنهار وتدمر الحياة والممتلكات القائمة حولها (شكل 2.12).

الجوفية والماء المنصهر عن الثلج أو الجليد على اليابسة. وتأتى كل هذه المياه أساساً نتيجة تساقطها. كما تنتج كميات صغيرة من الماء العذب في بعض المناطق القاحلة في الشرق الأوسط وخاصة في الخليج العربى، من تحلية الماء المالح **desalination** (أى إزالة الملوحة منه). لذلك فإن الحد العملى لكمية الماء العذب الذى يمكن أن نستخدمه هو الكمية التى تسقط على القارات. ويعنى ذلك أيضاً، أن الماء العذب هو مصدر متجدد. وعلى الرغم من أننا قد نستنزف هذه المصادر من الماء مؤقتاً، إلا أن التساقط سوف يعوض هذا الاستنزاف خلال عدة آلاف أو مئات من السنين.

وينقسم الماء المتساقط على الأرض إلى ثلاثة أجزاء، جزء منها يشمله الجريان السطحي، بينما يتبخر جزء آخر ويتسرب الجزء الثالث. ويستطيع الإنسان أن يستخدم الجزء من الماء الذى يتسرب في الأرض ليكون المياه الجوفية، بحفر الآبار. أما الجريان السطحي فيشمل الجزء من الماء الذى يمكن للإنسان أن يستخدمه بسهولة ويسر من الأنهار والمجارى المائية. وتؤثر أنشطة الإنسان وتتداخل في عمليات دورة الماء الطبيعية. وسنذكر فيما يلى بعض تدخلات الإنسان في هذه الدورة:

- يزيد التبخر نتيجة استخدام مياه الري في الأراضي الجافة.
- يؤثر تمهيد الطرق وتعييدها على سطح الأرض وخاصة في الطرق الطويلة السريعة، والمباني في تقليل الماء المتسرب.
- يمكن أن تؤدي أنشطة الإنسان في التدفئة عالمياً وكذلك عملياً إلى انصهار جليد الثلج؛ مما يؤثر في اتزان الماء في الخزانات الأخرى.



شكل (2.12): صورة من أحد مواقع شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت) توضح فيضان أحد الأنهار بالهند .

أودية للمجاري المائية تفصلها عن بعضها مرتفعات، نتيجة عملية التجوية والتعرية .

أ. العالم الرئيسية للنظام النهري

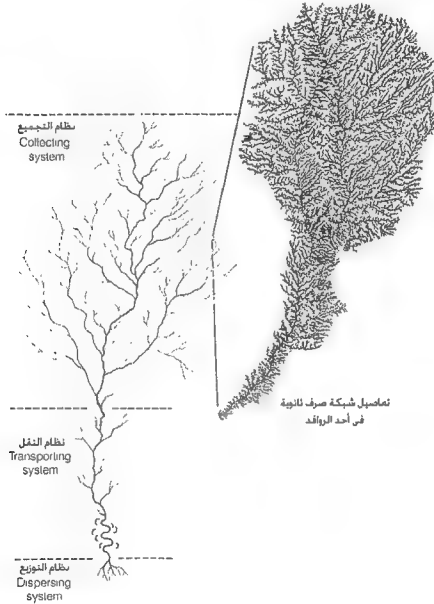
يتكون النظام النهري river system من قناة رئيسية ، وهي الجزء المنخفض الذي يجري فيه الماء ، كما يشمل أيضا كل المجاري المائية الأصغر التي تصب في القناة الرئيسية وتعرف بالروافد tributaries . ويحيط بكل مجرى مائي حوض صرف drainage basin ، وهو المساحة الكلية التي تتجمع مياهها وأمطارها لتغذية هذا المجرى المائي . ويلاحظ أن لكل مجرى مائي حدودًا عند أطرافه ، قد تكون بعيدة أو قريبة عن مجراه ، تعرف بمقسم المياه divide water وهو عبارة عن حيد أو تل مرتفع من الأرض يفصل بين حوضي صرف لنهرين متجاورين . وفي النظام النهري ، يتحدد سطح الأرض ناحية شبكة من الروافد بحيث يعمل

وبالإضافة إلى أهمية المجاري المائية العملية والجيالية، فإن للمجاري المائية أهمية حيوية كمواصل جيولوجية في النواحي التالية:

1. تحمل المجاري المائية معظم الماء الذي يتدفق من اليابسة إلى البحر ، وبذلك فإنه يعتبر جزءًا مهمًا من دورة الماء .
2. تقوم المجاري المائية بنقل بلايين الأطنان من الرواسب إلى المحيطات كل عام ، حيث يتم الترسيب وتصبح الرواسب في النهاية جزءًا من التتابع الطبقي للأرض .
3. تقوم المجاري المائية بنقل كميات صغيرة من الأملاح الذائبة التي تكونت أثناء عملية التجوية إلى البحر . ويلعب هذا النقل دورًا مهمًا في الحفاظ على ملوحة ماء البحر .
4. تقوم المجاري المائية بدور رئيسي في تشكيل سطح الأرض . وتتكون التضاريس الأرضية أساسًا من

نظام الصرف drainage system على تجميع وإزالة الرواسب والحطام الصخرى الناتج من التجوية كما لو كان قمع تجميع. ويقسم النظام النهري النموذجي إلى ثلاثة أقسام : 1- نظام تجميع ، 2- نظام نقل ، 3- نظام توزيع

(انتشار) (شكل 3.12). ويعتبر التفرع صفة أساسية في عديد من الشبكات التي تقوم بتجميع المواد المختلفة وتوزيعها . فمثلا ، تقوم شبكة الدورة الدموية في الإنسان بتوزيع الدم على أجزاء الجسم المختلفة بنظام متفرع من الشرايين ، ثم تقوم بتجميعه بنظام آخر من



شكل (3.12): الأقسام الرئيسية للنظام النهري

يتميز كل قسم من أقسام النظام النهري بعمليات جيولوجية مختلفة . تتكون الروافد tributaries عند المنابع وتقوم بتجميع الماء والرواسب وتنصب في مجرى مائي رئيسي . يعمل المجرى الرئيسي كنظام نقل ، كما يقوم بالنحت والترسيب أيضا ويمثل الجزء السفلي من النهر نظام توزيع ، حيث ترسب معظم الرواسب في دلتا أو في مروحة طمية ، بينما ينشأت الماء في المحيط .

(After Hamblin, W.K., 1985: The Earth's Dynamics Systems, 4th edition. Burgess Publishing, Minneapolis).

هجرة النهر من الرواسب الخشنة وتنشأت الحبيبات الناعمة ومياه النهر في الحوض .

II. انسياب الماء في مجرى المياه الطبيعية

يمكن دراسة طبيعة الانسياب في الأنهار عن طريق وضع صبغات في المجرى المائي وملاحظة تحركه . وعندما يتحرك الماء في أنبوبة زجاجية بسرعة بطيئة جداً، فإنه ينساب فيها يعرف بالانسياب الرقائقي (الصفائحي) *laminar flow*، وهو أبسط أنواع الحركة ، حيث يتحرك الماء في طبقات متوازية دون أن تختلط أو تتقاطع . ونادراً ما يحدث الانسياب الرقائقي في المجاري الطبيعية ، إلا أنه قد يحدث في طبقات رقيقة جداً على امتداد قاع وجوانب المجرى المائي ، حيث يشيع هذا النوع من الانسياب في المياه الجوفية تحت سطح الأرض .

أما الانسياب المضطرب *turbulent flow* فهو نوع آخر من التحرك غير المنتظم للماء ، حيث توجد دوامات تؤدي إلى اضطراب الماء أثناء الانسياب (شكل 4.12) . ويتحرك الماء المصبوغ أثناء الانسياب المضطرب إلى أعلى وأسفل المجرى المائي وعلى جانبيه ، مما يوضح أن الماء يمكن أن يرفع الراسب غير المتناسك من قاع النهر وينقله حتى مصب المجرى المائي .

وانسياب الماء في المجرى المائي عملية معقدة تتأثر بعدة عوامل أهمها : أ. التصريف ، ب. السرعة التي يتحرك بها الماء ، ج. شكل وحجم قناة المجرى المائي ، د. انحدار قناة المجرى المائي ، هـ. مستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية) ، و. الحمولة (المواد التي يحملها أو يحركها الماء المناسب) .

أ. التصريف : معدل تحرك الماء

يبدو شكل المجرى المائي ثابتاً ومستقراً عندما ننظر إليه من فوق جسر لعدة دقائق ، أو من خلال قارب لعدة ساعات . ولكن قد يتغير حجم هذا المجرى المائي

الأورد . وعلى الرغم من أن الحدود بين الأقسام الثلاثة للدورة تكون عموماً تدريجية ، إلا أن الخصائص المميزة لكل قسم تكون ظاهرة . وفيما يلي عرض مختصر لكل قسم من أقسام النظام النهري .

أ. نظام التجميع

يتكون نظام التجميع *collecting system* أو نظام الصرف *drainage system* للنهر من شبكة من الروافد في منطقة أعالي النهر ومنبعه . والروافد *tributaries* هي مجارى مائية تقوم بتجميع المياه والرواسب لتصب في المجرى المائي الرئيسي . وتأخذ الروافد عادة النمط الشجري *dendritic* (مثل الشجرة) ، مع العديد من التفرعات *branches* التي تمتد لأعلى المنحدر ناحية مقسم المياه . وتعتبر شبكة الروافد المعقدة واحدة من المعالم المميزة لنظام التجميع .

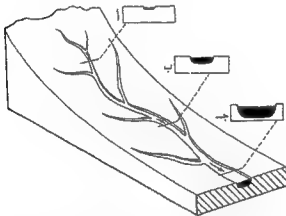
ب. نظام النقل

يتكون نظام النقل *transporting system* من المجرى الرئيسي الذي يعمل كقناة يتحرك فيها الماء والرواسب من منطقة التجميع إلى المصب . وبالرغم من أن نقل الماء هو العملية الأساسية في هذا النظام ، إلا أنه يتم في هذا الجزء أيضاً تجميع ماء ورواسب إضافية ، كما تحدث عملية ترسيب عندما ينثنى المجرى ، أو عندما يفيض النهر على ضفتيه أثناء فترة الفيضان . وهكذا فإنه تحدث عمليات تعرية وترسيب ونقل في نظام النقل النهري .

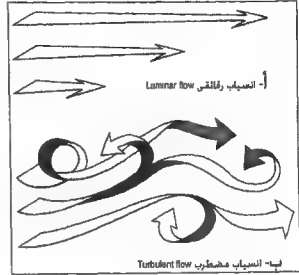
جـ. نظام التوزيع (الانتشار)

يتكون نظام التوزيع (الانتشار) *dispersing system* من شبكة من أفرع التوزيع *distributaries* عند مصب النهر ، حيث تشتت الرواسب والمياه في محيط أو بحيرة أو حوض جاف . وتتضمن العمليات الرئيسية في هذا النظام ترسيب

في العالم بالقياس عند عدة محطات خلال عدة سنوات .
وتستخدم هذه المعلومات كأساس لتخطيط استخدام
مصادر المياه والتحكم في الفيضان وحساب معدلات
التعرية وهكذا. وجدير بالملاحظة أن التصريف يزداد
في اتجاه مصب النهر بإضافة الماء من الروافد (شكل
5.12). ويتغير تصريف المجرى الصغير من حوالى
0.25 إلى 300 م³/ثانية ، بينما يتراوح تصريف
المجارى المائية الكبيرة (مثل الميسيسيبي) بين
1400 م³/ثانية إلى 57000 م³/ثانية وقت الفيضان .
ويوضح شكل (6.12) متوسط تصريف نهر النيل عند
أسوان عام 1944م دون تأثير لخزان أسوان . ويبلغ
أقصى تصريف للنهر في شهر سبتمبر حوالى 712 مليون
م³/اليوم ، بينما يكون أقل تصريف للنهر في شهر مايو
ويبلغ 35 مليون م³/اليوم . كما يوضح الشكل أن
الاختلاف في التصريف يرجع إلى كمية الماء أثناء
الفيضان . وبعد إقامة السد العالى بأسوان والتحكم في
كمية الماء ، انخفض التغير الموسمي في التصريف
بدرجة كبيرة .



شكل (5.12): التغيرات في نظام مجرى مائي نموذجي في اتجاه
المصب، حيث يقل انحدار gradient المجرى المائي ويزيد التصريف
discharge (كما هو موضح بزيادة الروافد المتابعة) ، كما يزيد
عمق المجرى المائي الرئيسي (كما هو موضح في القطاعات
العرضية أ و ب و ج) وسرعته (كما يدل عليها أطوال الأسهم الثلاثة).
(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).



شكل (4.12): أنواع الانسياب في الأنهار
أ) انسياب رافق laminar flow ، حيث تتحرك جزيئات الماء
في طبقات وخطوط متوازية.
ب) انسياب مضطرب turbulent flow ، حيث تتحرك جزيئات
الماء حركة غير منتظمة مع وجود دوامات أثناء الانسياب.
(After Hamblin, W.K., 1985: The Earth's
Dynamics Systems, 4th edition. Burgess
Publishing, Minneapolis).

وسرعته في مكان معين من شهر لآخر أو من موسم
لآخر . فالمجارى المائية هي أنظمة ديناميكية ترتفع فيها
المياه ، وقد تفيض أيضاً في بعض السنوات ، كما تغير
من شكل أوديتها خلال فترات زمنية أكبر . كما تغير
المجارى المائية من معدل تدفقها وأبعاد المجرى
الرئيسي عندما تنتقل من الروافد الضيقة الموجودة عند
منبع المجرى المائي إلى السهول الفيضية الأكثر اتساعا
عند الأجزاء الوسطى والسفلى من المجرى .

وتقدر كمية الماء الذي ينساب في المجرى المائي
بقياس التصريف discharge ، وهو كمية الماء التي
يمر بنقطة معينة في وحدة زمنية معينة أثناء انسيابه
خلال قناة لها عمق وعرض محددان. ويقاس التصريف
عادة بالأمتار المكعبة لكل ثانية أو بالقدم المكعب لكل
ثانية. ويُراقب تصريف معظم أنظمة الصرف الكبرى

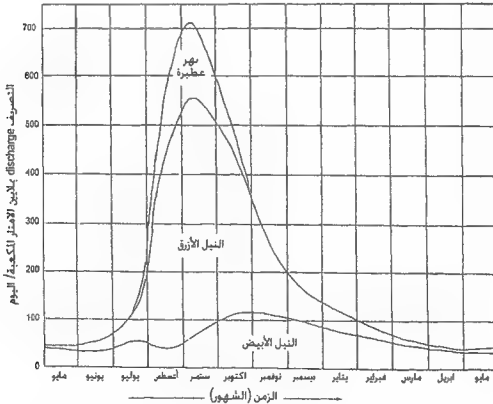
خروج الماء من الخرطوم سوف تزداد . فإذا زاد تصريف مجرى مائي عند نقطة معينة ، فإن كلا من سرعة خروج الماء ومساحة المقطع العرضي للمجرى تزداد (تتأثر السرعة أيضا بانحدار المجرى ودرجة خشونة قاع المجرى وجوانبه) . وتزداد مساحة القطاع العرضي عندما يشغل الانسياب نسبة أكبر من عرض وعمق قناة المجرى المائي .

ويزداد التصريف الطبيعي في معظم الأنهار في اتجاه مصب النهر نتيجة زيادة انسياب الماء في الروافد . والروافد كما ذكرنا سابقا هي مجارى مائية تتصل بمجرى مائي أكبر وتصرف فيه مياهها . وكما لاحظنا فإن زيادة التصريف تعنى أن العرض أو العمق أو السرعة يجب أن تزيد أيضا . ولكن عموما لا تزيد

ويمكن حساب التصريف عن طريق حساب مساحة القطاع العرضي (العرض \times متوسط عمق الجزء من المجرى الممتلئ بالماء) وكذلك حساب سرعة الانسياب (المسافة التي يقطعها الماء في الثانية):

التصريف discharge = مساحة القطاع العرضي للمجرى (متر مربع) \times سرعة الانسياب (متر مكعب/ ثانية)

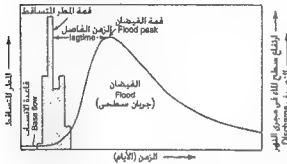
وتؤدي هذه المعادلة إلى توقع زيادة التصريف بزيادة مساحة القطاع العرضي أو سرعة الانسياب أو كليهما . فعندما يزيد ضغط الماء عند الصنبور فإن التصريف في خرطوم مياه الحديقة يزداد ، وحيث إن القطاع العرضي للخرطوم الممثل بقطر الخرطوم لا يتغير ، فإن سرعة



شكل (6.12): متوسط تصريف discharge نهر النيل عند أسوان عام 1944م دون تأثير لخزان أسوان . يبلغ أقصى تصريف للنهر في سبتمبر ، وأقل تصريف في مايو .

(After Hurst, 1944, in R. Said, 1981. The geological evolution of the River Nile. Springer Verlag).

بسرعة ويصل إلى قمة الفيضان . وتسمى هذه الفترة الزمنية الفاصلة بين قمة الماء المطر المتساقط وقمة الفيضان بالزمن الفاصل *lagtime* (شكل 7.12). وعند زيادة التصريف في فترة الفيضان تزيد سرعة انسياب الماء أيضاً . وتؤدي زيادة السرعة إلى زيادة الحمولة النهرية ، وكذلك زيادة حجم الجيبيات المنقولة.



شكل (7.12): شكل يوضح الزمن الفاصل *lagtime* وهو الفترة الزمنية الفاصلة بين قمى المطر المتساقط والفيضان .

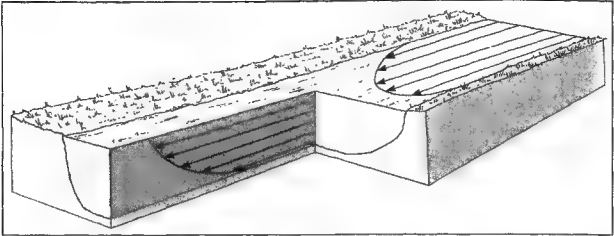
ويمكن أن تكون الفيضانات الكبيرة مدمرة وتسبب خسائر كبيرة في الأرواح والممتلكات . لذلك فإنه من الأفضل دراسة توقع حدوثها . وحيث أنه لا يمكن توقع مستوى الفيضان (سواء كان الارتفاع في الماء أو التصريف) في سنة معينة ، فإن أقصى ما يمكن عمله هو توقع ما يمكن حدوثه . فعلى سبيل المثال ، يمكن أن نتوقع احتمال حدوث فيضان بارتفاع ثلاثة أمتار فوق مستوى ضفة المجرى المائي بنسبة عشرين بالمائة . وتعنى هذه النسبة أن متوسط الفترة الزمنية بين فيضانين يبلغ ارتفاعها ثلاثة أمتار هو خمس سنوات ، (20% في 1 في 5 سنوات) . ويسمى الفيضان بهذا الارتفاع فيضان 5- سنوات . ويسمى متوسط الفترة الزمنية بين ظاهرتين لها شدة معينة (في هذه الحالة فيضان ارتفاعه ثلاثة أمتار) فترة تكرار *recurrence interval* . وبمعنى آخر ، فإن إمكانية أن يتكرر فيضان بحجم معين يطلق عليها فترة التكرار . ويسمى

السرعة في اتجاه مصب النهر بالدرجة التي نتوقعها من زيادة التصريف ، بسبب نقص انحدار القنوات السفلى من المجرى المائي (قلة الانحدار تؤدي إلى انخفاض السرعة) (شكل 5.12) .

الفيضانات

يعمل السقوط غير المنتظم للأمطار على مدار السنة ، وكذلك انصهار الجليد والثلج غير المنتظم أيضاً على أن يزيد الماء موسمياً في المجارى المائية ليكون ما يعرف بالفيضان . ويحدث الفيضان *flood* عندما يصبح تصريف المجرى المائي كبيراً للدرجة أنه يزيد عن قدرة قناة المجرى المائي ، مما يؤدي إلى ارتفاع منسوب الماء الذى يملأ القناة ، إلى الدرجة التى يتخطى فيها ضفتى المجرى المائي ويغمر أرضاً ليست جزءاً من مجراها . والفيضانات ظاهرة طبيعية متوقعة على الرغم من غضب بعض الناس عند حدوثها . وتفيض بعض الأنهار بانتظام ، كما يفيض البعض الآخر على فترات غير منتظمة ، بينما يفيض نهر النيل كل عام . كما تختلف الفيضانات في الحجم أيضاً ، فبعضها يكون كبيراً وله مستوى ماء مرتفع جداً يستمر لعدة أيام ، بينما تكون بعض الفيضانات الأخرى صغيرة . والفيضانات الصغيرة هى الأكثر شيوعاً ، وتحدث في المتوسط كل عامين أو ثلاثة أعوام بينما تحدث الفيضانات الكبيرة عادة كل عشرة أو عشرين أو ثلاثين عاماً .

وتظهر التصريفات الكبيرة غير العادية والمصاحبة للفيضانات على هيئة قمة بارزة على الرسم المائي (هيدروجراف) *hydrograph* ، وهو رسم يوضح العلاقة بين تصريف المجرى المائي والزمن . وجدير بالملاحظة أن مستوى الماء في المجرى المائي لا يرتفع بمجرد سقوط الأمطار ولكن يحتاج الماء إلى بعض الوقت ليتحرك من مكان انسيابه على سطح الأرض حتى يصل إلى قناة المجرى المائي ، ليزداد التصريف

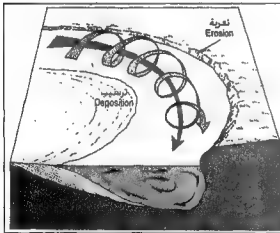


شكل (8.12): التغير في سرعة انسياب الماء في القنوات المستقيمة ، حيث تحدث تلك التغيرات أفقياً ورأسياً عندما يقلل الاحتكاك من سرعة الماء على امتداد قاع وجوانب المجرى المائية . وتزيد سرعة الانسياب كلما اقتربنا من سطح ومركز قناة المجرى المائي المستقيمة

(After Hamblin, W.K., 1985: The Earth's Dynamics Systems, 4th edition. Burgess Publishing, Minneapolis).

وتتناسب سرعة انسياب الماء مع انحدار قناة المجرى المائي . ويؤدي الانحدار الشديد لقاع المجرى

الفيضانات الأكبر حجماً (سنة أمتار مثلاً) للمجرى المائي نفسه والمحتمل حدوثه كل 50 سنة فقط بفيضان - 50 سنة .



شكل (9.12): انسياب الماء في قناة منحنية ، حيث يتبع الانسياب نمطاً حلزونيّاً ويجري الماء على الانسياب في الجزء الخارجى من المنحنى بسرعة أكبر من الجزء الداخلى . ويؤدي هذا الاختلاف في سرعة الانسياب ، بالإضافة إلى الاحتكاك الطبيعي بجدار قناة المجرى المائي ، إلى تكون نمط حلزوني للانسياب . ونتيجة لذلك ، فإن التعرية تحدث على الضفة الخارجيّة ، بينما يحدث الترسيب على الجزء الداخلى من المنحنى . وتؤدي تلك العمليات إلى تكون مجرى مائى غير متناظر بهاجر جانبيّاً بطيء .

(After Hamblin, W.K., 1985: The Earth's Dynamics Systems, 4th edition. Burgess Publishing, Minneapolis).

ب. السرعة التي يتحرك بها الماء

لا تكون سرعة انسياب الماء منتظمة في كل مكان على طول قناة المجرى المائي . وتعتمد هذه السرعة كما ذكرنا على شكل وخشونة قناة المجرى المائي ، وكذلك على نمط المجرى المائي . وتزيد سرعة الانسياب كلما اقتربنا من سطح ومركز قناة المجرى المائي، حيث يكون العمق أكبر ما يكون ويقلل احتكاك الماء بجدران المجرى المائي والقاع (شكل 8.12) . وعندما تنحني قناة المجرى في منعطف meander فإن نطاق السرعة الأعلى ينتقل إلى الجزء الخارجى من الانحناء بينما ينتقل نطاق السرعة الأقل إلى الجزء الداخلى للمنحنى (شكل 9.12) . وهذا النمط من الانسياب مهم في التعرية الجانبية لقنوات المجرى المائي، وتغير شكل أنماط المجرى المائية .

الضحلة (شكل 10.12 ب)، والتي يكون قاعها مسطحا تقريبا . ويؤدي نقص سرعة الانسياب في كلتا الحالتين إلى تأخر الانسياب . وتكون سرعة الانسياب أكبر ما يكون في القنوات التي تكون بها أقل مقاومة للانسياب . ففي القنوات شبه الدائرية (شكل 10.12 ج) تكون مساحة السطح لكل وحدة حجم من الماء أقل ما يمكن ، وبالتالي يكون بها أقل مقاومة للانسياب .

وبالإضافة إلى ما سبق ، فإن الانسياب يقل في القنوات خشنة الجوانب والقاع ، وكذلك تلك التي ينتشر بها الجلاميد والعوائق الأخرى ، بينما يتحرك الماء بسرعة أكبر في القنوات المساء المغطاة بالصملاص ، حيث تكون المقاومة أقل .

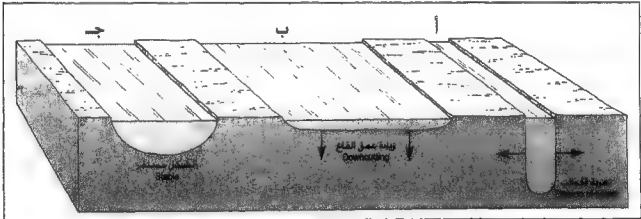
د - انحدار قناة المجرى المائي

يكون انحدار **gradient** قاع المجرى المائي أشد في مناطق أعالي النهر جهة المنبع ، ويقل الانحدار لأسفل في اتجاه المصب . ويوضح شكل (11.12) حوض النيل وارتفاع النهر فوق سطح البحر في عدة

المائي إلى الانسياب السريع ، وهو يحدث عادة في المجارى المائية المتواجدة في المناطق المرتفعة . وتكون الجنادل **rapids** عندما تكون الانحدارات قليلة ، بينما تكون مساقط المياه **waterfalls** عندما تكون الانحدارات شديدة جدا حيث تكون سرعة الحركة حينئذ مساوية لسرعة السقوط الحر . وعندما يدخل المجرى المائي في بحيرة أو محيط فإن معدل السرعة يتناقص فورا إلى الصفر . وتعتمد أيضا سرعة الماء المنساب في قناة المجرى المائي على الحجم ، فكلما زاد الحجم ، كان الانسياب أسرع .

جـ. شكل وحجم قناة المجرى المائي

يؤثر شكل القطاع العرضي لقناة المجرى المائي على طبيعة الانسياب ، وكذلك على السرعة التي يتحرك بها حجم معين من الماء في المجرى حتى المصب . ففي القنوات العميقة الضيقة (شكل 10.12 أ) ، تكون مساحة السطح لكل وحدة حجم من الماء كبيرة جدا ، مما يؤدي إلى نقص سرعة الماء نتيجة زيادة الاحتكاك . وبالمثل تكون مساحة السطح كبيرة في القناة العريضة



شكل (10.12): تغير قنوات المجرى المائي شكلها لتقلل الاحتكاك أثناء الانسياب

أ. قناة عميقة ضيقة ، حيث تكون مساحة السطح لكل وحدة حجم من الماء كبيرة . وتؤدي التربة نتيجة زيادة الاحتكاك لزيادة عرض القناة .
ب. قناة عريضة ضحلة ، حيث تكون مساحة السطح كبيرة ، مما يؤدي إلى انخفاض سرعة الماء وترسيب بعض حجارة النهر . وتميل القناة لأن تصبح أعمق وأضيق .

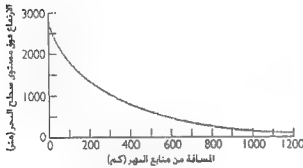
ج. قناة شبه دائرية ، حيث تكون مساحة السطح لكل وحدة حجم من الماء أقل ما يمكن ، وتكون بها أقل مقاومة للانسياب .

(After Hamblin, W.K., 1985: The Earth's Dynamics Systems, 4th edition, Burgess Publishing, Minneapolis).

نحو المنبع ، والذي يكون حاداً بشكل ملحوظ بالقرب من منبع المجرى المائي ، بينما يقل الانحدار ويكون مستويًا تقريباً بالقرب من المصب . ويوضح شكل (13.12) قطاعاً طوليًّا في نهر النيل من بحيرة فيكتوريا وحتى البحر المتوسط ، وهو يوضح معدل انحداره ، والذي يتراوح بين 1:10000 و 1:12000 من أسوان حتى القاهرة .

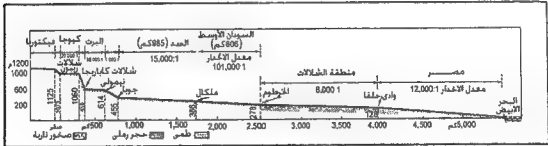
ويرجع السبب في أن كل المجارى المائية ، والتي قد تختلف عن بعضها في بعض التفاصيل ، يكون لها القطاع الطولي نفسه إلى وجود عدد من العوامل التي تتحكم في عمليات التعرية والترسيب ، حيث تكون التعرية أسرع عند منبع النهر عنها عند مصبه ، بينما يكون الترسيب هو العامل الأقوى عند مصب المجرى المائي .

مواقع لتوضيح اختلاف درجة انحدار النهر . فكلما تحركنا نحو المصب قل الانحدار . ويمكن وصف انحدار نهر ما من المنبع حتى المصب من ملاحظة القطاع الطولي للنهر . ويقاس انحدار المجرى المائي بالأمتار لكل كيلو متر أو بالقدم لكل ميل . فإذا كان الانحدار 5 أمتار لكل كيلو متر ، فهذا يعني أن قاع النهر يهبط خمسة أمتار رأسياً لكل كيلو متر على امتداد النهر أفقياً . ويوضح شكل (12.12) انحدار أنهار بلات South Platte ومنبع وسط كولورادو وحتى المصب في نبراسكا . ويسمى هذا المنحنى الأملس المقعر نحو المنبع ، والذي يعطى صورة لقطاع في النهر ، بالقطاع الطولي longitudinal profile . ويكون لكل المجارى المائية ، من الجداول الصغيرة حتى الأنهار الكبيرة الشكل العام المقعر نفسه



شكل (12.12): قطاع طولي longitudinal profile في نهرى بلات South Platte وسوث بلات من المنبع وحتى المصب . ويرسم القطاع الطولي بإسقاط ارتفاع قاع المجرى المائي مقابل المسافة من المنبع . وتتميز كل المجارى المائية ، سواء كانت جداول أو أنهار كبيرة ، بهذا الشكل العام للقطاع الطولي المقعر نحو المنبع ، على الرغم من أن المنحنى قد يكون أكثر أو أقل حدة .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition, W. H. Freeman and Company, New York).



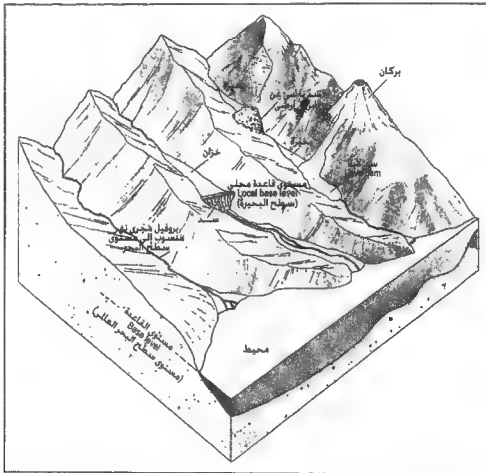
شكل (13.12): قطاع طولي لنهر النيل من بحيرة فيكتوريا إلى البحر المتوسط ، يبين معدل انحدار بسطات النهر والأنهار الموصلة لها . (المصدر: سعيد، رشدى ، 1993م . نهر النيل : نشأته واستخدام مياهه في الماضي والمستقبل، دار الهلال).

للتعرية لمعظم المجارى المائية (شكل 14.12)، ويستثنى من ذلك المجارى المائية التى تصب فى أحواض داخلية مغلقة غير متصلة بالبحر، مثل البحيرات. كما يعتبر النهر الرئيسى مستوى قاعدة لروافده.

وعند ربط مستوى القاعدة لمعظم المجارى المائية بسطح البحر فإنه يجب أن نعرف أن مستوى سطح البحر فى العالم قد تغير عبر الأزمنة الجيولوجية الطويلة نتيجة التغير فى شكل وسعة أحواض المحيطات، ونمو

هـ. مستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية)

عندما ينساب مجرى مائى فى اتجاه مصبه، فإن طاقته الكامنة (طاقة الوضع) تقل حتى تصل إلى الصفر عندما يصل إلى البحر. وعند ذلك لا تكون للمجرى المائى القدرة على أن يُعمق قاعه. ويسمى المستوى النهائى الذى يصل إليه قاع المجرى المائى أو النهر بحيث لا يكون قادرا على مزيد من التعرية بمستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية) **base level** للمجرى المائى. ويعتبر سطح البحر هو الحد الأدنى



شكل (14.12): علاقة المجارى المائية بمستوى القاعدة **base level** (مستوى سطح البحر على مستوى العالم) وبالمستويات الأدنى المحلية. ينساب المجرى المائى على اليسار مباشرة إلى المحيط، والذي يمثل المستوى التاعلى (المستوى الأدنى للتعرية) له، بينما ينساب المجرى المائى (فى الوسط) إلى خزان مائى خلف السد، حيث يمثل الخزان الحد الأدنى للتعرية للمحلى؛ بينما يكون المحيط هو مستوى القاعدة لجزء المجرى المائى أسفل السد. وبالمثل يوجد مستويان أدنيان للتعرية للمجرى المائى على اليسار، بينما يكون المحيط هو مستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية) أسفل الالاية.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

رقائقاً (صفائحية) أن يحمل أصغر وأخف الحبيبات فقط ، وهي عادة في حجم الصلصال . أما الماء المنساب انسياباً مضطرباً ، فإنه يستطيع أن يحرك حبيبات تتراوح بين حجم الصلصال وحجم الحصى بل والحصى الكبير (جليمود) . وعندما يحمل الماء المنساب انسياباً مضطرباً الحبيبات من قاع المجرى المائي ، فإنه يحملها في اتجاه المصب . كما يقوم بدرجة ودفع الحبيبات على القاع . وتشمل الحمولة المعلقة **suspended load** للمجرى المائي كل المادة المعلقة في الماء المنساب سواء كانت بصورة مؤقتة أو دائمة . أما حمولة القاع **bed load** للمجرى المائي فهي تشمل المادة التي يحملها المجرى المائي على امتداد قاع المجرى بالانزلاق أو الدحرجة (شكل 15.12) .

وكلما كان التيار أسرع ، كلما كان حجم الحبيبات المنقولة كحمولة معلقة أو حمولة قاع أكبر ، وتسمى قدرة المجرى المائي على حمل مادة أو فتات من حجم معين بالكفاءة **competence** . ويلاحظ أن القدرة على نقل هذا الفتات تقدر بحجم الحبيبات المنقولة وليس بكميتها . وعندما تزيد سرعة التيار ويحمل الحبيبات الخشنة تزداد الحمولة المعلقة ، وتتحرك في نفس الوقت كميات أكبر من مادة القاع ، وتزداد أيضاً حمولة القاع . وكما هو متوقع ، فكلما زاد حجم الانسياب زادت الحمولة المعلقة أو حمولة القاع التي يستطيع هذا الانسياب حمله . وتسمى كمية الرواسب الكلية المحمولة بالانسياب بقدرة **capacity** المجرى المائي .

ويؤثر التداخل بين السرعة وحجم الانسياب في كل من كفاءة وقدرة المجرى المائي ، فيحمل نهر الميسيسيبي على امتداد معظم مساره حبيبات يتراوح حجمها بين دقيقة إلى متوسطة الحجم فقط أى صلصال ورمل ، عند السرعات المتوسطة ولكن بكميات كبيرة . أما

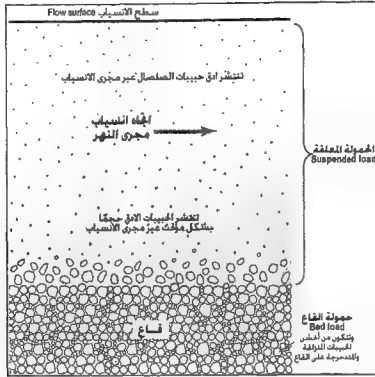
أو انكماش المثالغ على القارات ، ولذلك فإن مستوى القاعدة يتغير دائماً ببطء .

ونجد الإشارة إلى أن كل المجارى المائية لا تنساب بانتظام من المنبع حتى المصب ، فقد تعترض البحيرات بعض هذه المجارى ، حيث تتكون هذه البحيرات خلف سدود طبيعية نتجت عن انزلاقات أرضية أو رواسب جليدية أو انسياب للابدة . وعندما ينساب مجرى مائي في بحيرة ، فإن سطح البحيرة يعمل كمستوى قاعدي محل للتعرية (شكل 14.12) . وقد ينخفض ماء البحيرة ويصرف خارجها لأى سبب من الأسباب . وعند تغير مستوى القاعدة المحلي ، فإن المجرى المائي يغير من شكل مقطعه الطولي ليكون في حالة اتزان مع الظروف المتغيرة .

كما أن إقامة السدود الصناعية الكبرى على الأنهار يقطع الانسياب الطبيعي للمجرى المائي . وتبنى هذه السدود بغرض تخزين الماء والتحكم في الفيضان وتوليد الطاقة الكهربائية (طاقة كهرومائية) . وتعمل هذه السدود والماء المتجمع أمامها على رفع مستوى القاعدة بالتهر ، وكذلك تغيير شكل القطاع الطولي للنهر ليتوافق مع الظروف الجديدة . ويرجع السبب في ذلك إلى أن بناء السد الصناعى على المجرى المائي يؤدي إلى تكوين خزان ، يقوم بحجز معظم الرواسب التي كان يحملها هذا المجرى إلى المحيط . ويؤدي ذلك إلى تراكم الرواسب التي تملأ الخزان في النهاية . وهذه واحدة من المشكلات التي تواجه إنشاء السدود على المجارى المائية ، وتتنبأ بعض الدراسات أن بحيرة ناصر أمام السد العالى جنوب أسوان بمصر سيمتلئ نصفها تقريباً بالطمي خلال القرن الحادى والعشرين .

و. الحمولة

تختلف قدرة المجارى المائية على التعرية وحمل الفتات والرواسب . ويستطيع الماء المنساب انسياباً



شكل (15.12): عندما ينساب تيار مائي في مجرى يتكون قاعه من الرمل والغرين والصلصال، فإنه ينقل الحبيبات بطريقتين هما النقل كحمولة قاع bed load حيث تنزل الحبيبات الخشنة وتندرجح على امتداد القاع، أو كحمولة عالقة suspended load حيث تعلق الحبيبات الناعمة بالماء المنساب لبعض الوقت أو طول الوقت.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

أ. القنوات المستقيمة

يعتبر وجود أجزاء مستقيمة في القنوات النهرية الطبيعية أمراً غير شائع. وتتشأ الاستقامة في القنوات النهرية عند مرور القناة في منحدرات شديدة أو أن تتبع خطوط انكسارات أو صدوع أو فواصل في القشرة الأرضية. بينما يسمى شكل القناة النهرية التي بها عدة انحناءات شكلاً متعرجاً. وإذا فحصنا جزءاً مستقيماً من قناة طبيعية عن قرب، لوجدنا أن به بعض الانحناء أو التعرج، حيث لا يتبع الخط الذي يصل بين أعماق الأجزاء في القناة مساراً مستقيماً متساوياً البعد بين الضفتين، ولكنه يتعرج جيئةً وذهاباً عبر القناة. وقد ينتج مثل هذا النمط في البداية نتيجة تغيرات عشوائية في عمق القناة. وفي المناطق التي يكون فيها عند أحد جانبي القناة مياهها عميقة، تترامى الرواسب على

في حالة مجرى مائي جبلي صغير حاد الانحدار وسريع الانسياب، فإنه يستطع حمل الجلاميد، ولكن بكميات قليلة فقط. وسنناقش نقل الرواسب وتعرية الأرض في أجزاء أخرى تالية.

III. أشكال القنوات النهرية

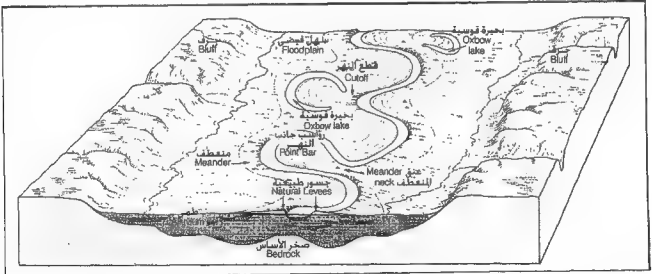
تختلف القنوات النهرية في حجمها وشكلها. ويرجع تعدد أشكال القنوات النهرية إلى اختلاف أنواع العلاقات التي تربط بين انحدار gradient القنوات وتصريفها discharge وحولتها load من الرواسب. وناقش هنا ثلاثة أشكال من القنوات النهرية وهي المستقيمة والمنعطفة أو المثنية والمجدولة أو المضفرة.

أراضي منخفضة، حيث تقطع القنوات ورواسب غير متماثلة (رمل ناعم وغرين أو طين) أو صخر أساس سهل التعرية. وتقل المنعطفات على المنحدرات المرتفعة وصخور الأساس الصلبة، حيث تتبادل المنعطفات في تلك المناطق مع امتدادات مستقيمة نسبياً وطويلة. وقد يرجع وجود المنعطفات أيضاً إلى أن انسياب الماء يكون مضطرباً، ويعمل أى انحناء أو عدم انتظام في القناة إلى انسياب الماء إلى الضفة المقابلة. وتسبب قوة الماء التي تضرب ضفة (جانب) المجرى المائي في حدوث نحت وتقويض، مما يؤدي إلى بدء انحناء صغير في مجرى النهر. ومع استمرار اصطدام التيار بالجانب الخارجي للقناة، ينمو المنحنى ويتحول إلى منعطف كبير. وكما ذكرنا سابقاً، فإن المياه تكون ضحلة وسرعته منخفضة عند الناحية الداخلية من المنعطف، حيث تتراكم بعض حولة الرواسب خشنة الحبيبات، لتكوّن ما يعرف برواسب جانب النهر أى الحاجز الحرفي (الجانبى) **point bar** عند الناحية الداخلية لحلقة المنعطف (شكل 16.12). وتؤدي هاتان العمليتان

الجانب المقابل من القناة على هيئة حاجز **bar**، حيث تكون السرعة أقل. ويعمل الانسياب المتعرج عبر القناة على تكوين تعاقب من الحواجز على جانبي القناة بالتبادل. وتعتبر قناة مجرى النيل في مصر قناة مستقيمة تقريباً أو حتى متعرجة، ولكن لا يعتبر نهر النيل نهراً منعطفًا، على الرغم من احتوائه على القليل من المنعطفات خاصة في الدلتا.

ب. القنوات المنعطفة أو المتشبية

تتكون قناة المجرى المائي في عديد من المجارى المائية من تتابع من الانحناءات والأقواس المماثلة المتتالية في الحجم. وتشبه هذه الانحناءات والأقواس في شكلها الطريق المتعرج في منطقة جبلية (شكل 16.12). ويسمى هذا الانحناء في قناة المجرى المائي بالمنعطف **meander**، وهو مشتق من الاسم اللاتيني لنهر مندريس **Menderes River** في تركيا، والذي يتميز بمجره المتعرج. ويجب ملاحظة أن المنعطفات لا تتكون مصادفة، بل تتكون عادة في مجارى مائية تنساب على منحدرات لطيفة الانحدار في سهول أو



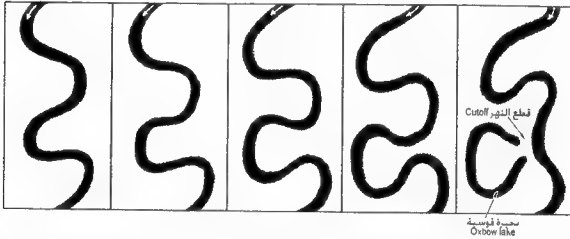
شكل (16.12). المعالم الرئيسية المميزة للسيل الفيضي **flood plain**. ويحتوى السهل الفيضي على منعطفات **meanders** ورواسب جانب النهر **point bars** وبحيرات قوسية **oxbow lakes** وجور طبيعية **natural levees** ومجارى يازو **yazoo streams** (والذي يعتبر راندا منساباً موازياً للنهر الرئيسى ويوجد صعوبة في الالتقاء به بسبب الجسور الطبيعية العالية).

(After Hamblin, W.K., 1985: The Earth's Dynamics Systems, 4th edition. Burgess Publishing, Minneapolis).

النهاية ، تقطع قناة النهر حلقة المنعطف وتسير في مجرى آخر أقصر . ويؤدي قطع النهر **cutoff** للمنعطف إلى زيادة حدة انحدار مجرى النهر ، مما يؤدي إلى أن يتخلل النهر تماماً عن حلقة المنعطف القديمة نتيجة الترسيب على امتداد حافة القناة الجديدة ، وتبقى حلقة المنعطف القديمة على شكل بحيرة هلالية الشكل ، تعرف بـ **oxbow lake** (شكل 12). قوسية (بحيرة قرن الثور) **oxbow lake** (شكل 12). 17 و 16 ، أو بحيرة مقطوعة أو متبقية.

الرئيسيتان من النحت في الناحية الخارجية من المنعطف، والترسيب على الناحية الداخلية، إلى تحرك حلقة المنعطف وهجرتها جانبياً حيث يزداد الراسب على إحدى ضفتي المجرى المائي بينما ينقص على الجانب الآخر .

وهكذا ، فإن المنعطفات تغير مكانها من جانب إلى آخر ، كما تغير مكانها أيضاً في المجرى المائي في اتجاه المصب ، حيث تتحرك بطريقة ملتوية مثل الحية ، أو كما يتحرك حبل طويل على شكل ثعبان (شكل 17.12) .



شكل (17.12): المراحل المتعاقبة في تكوين المنعطفات ، حيث يؤدي قطع النهر للمنعطف إلى تكوين بحيرة قوسية (بحيرة قرن الثور) .

(After Holmes, D.L., 1984: Holmes Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson, Great Britain).

جد القنوات المجدولة أو المضفرة

يكون لبعض القنوات النهرية عدد من القنوات وليس قناة واحدة . وتتفرع القنوات ثم تتحد في هذه المجارى المجدولة أو المضفرة **braided streams** في نمط يشبه الشعر المجدول . وينساب الماء في القنوات المجدولة في قناتين متجاورتين أو أكثر ولكنها متصلة ببعضها ، حيث يفصل بينها حواجز أو جزر (شكل 18.12) . ويتكون هذا الشكل نتيجة وجود حمل رسوبي كبير وتغير كبير في حجم الماء المنساب ، بالإضافة إلى وجود جوانب للنهر سهلة التعرية ، والتي

وقد تكون هجرة المنعطفات سريعة ، حيث قُدرت حركة بعض المنعطفات في نهر الميسيسيبي بحوالى 20 متراً في العام . وحينما تتحرك المنعطفات ، فإن الحواجز الحرفية تتحرك أيضاً ، ويتكون تراكم من الرمل والغرين على جزء من السهل الذى هاجرت خلاله القناة . ويؤدي نشأة المنعطف وتطوره إلى قلة انحدار النهر .

وتنمو الانحناءات مقتربة من بعضها أكثر فأكثر بطريقة غير منتظمة . وعندما يصبح منحنى المنعطف واضحاً وبارزاً ، فإنه يكون دائرة كاملة تقريباً . وفي

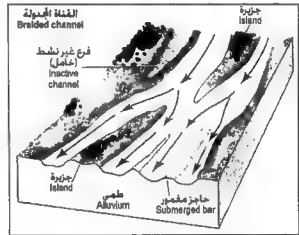
الأرض العارية فإنها تزيح أجزاء صغيرة من التربة السائبة وتنتشر في كل الاتجاهات ، حيث تتحرك مكونات التربة فوق المنحدرات . وجدير بالملاحظة أن تأثير قطرة واحدة يكون محدودا ، بينما يكون تأثير عدد ضخم من القطرات كبيرا جداً في التعرية . كما يلاحظ أن تأثير قطرات الماء على الأرض المغطاة بالنبات يكون محدودا .

ونستطيع أن نلاحظ تيار الماء وهو يلتقط الرمال السائبة من قاع المجرى بسرعة ويحملها بعيداً ويتعري القاع . وتستطيع المجارى المائية عند ارتفاع مستويات الماء بها أثناء الفيضان أن تقطع جوانب المجارى المائية غير المتناسكة ، حيث تتدهور وتسقط في الماء المنساب وتُحمل بعيداً .

وتعتمد قدرة المجرى المائى على التقاط حبيبات الراسب السائبة وتحريكها على امتداد القناة على مدى اضطراب الماء وسرعته . ويوضح شكل (19.12) السرعات المطلوبة لتعرية حبيبات من أحجام مختلفة من قاع مجرى مائى ، ومدى السرعة التى يمكن خلالها نقل الحبيبات ، والسرعات التى لا تستطيع بعدها الحبيبات الحركة وتستقر على القاع . وتزيد قدرة الماء المضطرب على حمل حبيبات أكبر حجماً كلما زادت سرعته ، ويستثنى من ذلك الغرين والصلصال ، حيث إنها تميل للتماسك وتكون كتلة متماسكة لمساء يصعب تعريتها . إلا تحت ظروف سرعة عالية .

وجدير بالذكر ، أننا لا نستطيع ملاحظة التعرية البطيئة للصخر الصلب ، حيث يقوم الماء الجارى بتعرية الصخر الصلب بعمليات كالبرى والتجوية الكيميائية والطبيعية أو التفويض الذى ينشأ من تأثير التيارات.

تستطيع أن تمد المجرى المائى بحمل وافر من الرواسب . فإذا كان النهر غير قادر على تحريك كل الحمولة الرسوبية الموجودة ، فإنه يكونُ راسباً خشن الحبيبات على هيئة حاجز يقسم الانسياب عملياً ويركزه في الأجزاء الأعمق من القناة على أحد الجانبين . وقد يرتفع هذا الحاجز لأعلى فوق سطح الماء نتيجة الترسيب المستمر ليكونُ جزيرة قد تصبح مستقرة نتيجة نمو النباتات فوقها . ويبلغ عدد الجزر في نهر النيل من أسوان إلى القاهرة 492 جزيرة ، هذا عدا الجزر الصخرية جنوب أسوان . وتكون معظم هذه الجزر مستطيلة الشكل ، وتتكون من الرمل والغرين ، ويقع معظمها في الأجزاء المنعطفة من قناة مجرى النيل .



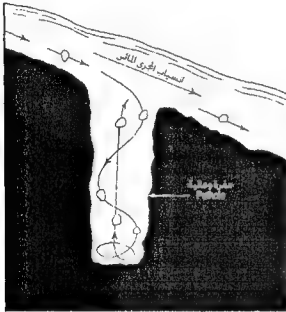
شكل (18.12): تتميز القناة الرئيسية في القنوات المجدولة أو الضفيرة braided channel بوجود جزر . وتوضح الأسهم اتجاه انسياب المجرى المائى ، كما توضح المسار الذى يصل بين أعمق الأجزاء من المجرى المائى .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

IV. التعرية بالمجارى المائية

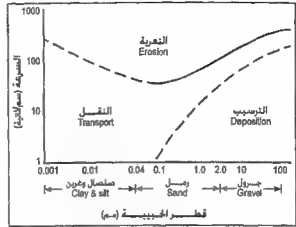
يبدأ النحت بالمياه حتى قبل أن يتجمع الماء في مجرى مائى محدد . وتحدث التعرية إما بالتصادم عندما تضرب قطرات الماء الأرض ، أو بانسياب مياه الأمطار الغزيرة فوق سطح الأرض . فعندما تضرب قطرات المطر

في الأنهار نتيجة التعرض لهذه التصادمات بمعدل أكبر بكثير مقارنة بالتجوية البطيئة على جوانب التلال اللطيفة الانحدار فوق اليابسة . وقد تستطيع بعض الدوامات القوية اقتلاع وسحب بعض الكتل الكبيرة من صخر الأساس بقاع النهر نتيجة التجوية والتصادم.



شكل (20.12): تعرية قاع المجرى المائي الصخري . تتكون الحفر الوعائية *potholes* ، عندما تتحرك وتدور القطع الصخرية الخشنة داخلها بفعل الدوامات الرأسية لتكون حفرا عميقة في صخور القاع . (After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وتكون تعرية الصخور قوية خاصة عند الجنادل ومساقط المياه (الشلالات) . والجنادل *rapids* مناطق في مجرى النهر يكون التيار فيها أسرع من غيرها نتيجة زيادة مفاجئة في انحدار المجرى ، ولكن يكون الانحدار غير كاف لإحداث مساقط مياه (شلالات) *waterfalls* والتي تتكون عندما تكون الانحدارات شديدة جدا ، حيث تساوى سرعة تحرك المياه حينئذ سرعة السقوط الحر . وتتسبب سرعة الماء والاضطراب الكبير في تكسر الكتل الكبيرة إلى قطع صغيرة وتُحمل بعيداً بواسطة التيار القوي .



شكل (19.12): شكل يوضح كيفية تحكم سرعة المجرى المائي في تعرية ونقل وترسيب حبيبات الرواسب من مختلف الأحجام .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

أ. البرى

يعتبر البرى إحدى الطرق الرئيسية التي يستطيع بها النهر تكسير الصخر وتعريته . والبرى *abrasion* هو تأكل الصخر ميكانيكياً نتيجة احتكاكه بالحصى والرمال التي تحملها المياه . وقد يؤدي دوران بعض الحصى والحصى الكبير (الجلاميد) في الدوامات المتحركة على قاع النهر إلى تكوين حفر ناعمة الجدران دائرية الشكل تشبه القدر تعرف بالحفر الوعائية *potholes* (شكل 20.12) ، حيث تستمر القطع الصخرية الخشنة في الدوران والحركة داخل الحفر بفعل التيارات النهرية.

ب. التجوية الكيميائية والطبيعية

تعمل التجوية الكيميائية على تحليل الصخور في قيعان القنوات النهرية ، وذلك بتغيير التركيب المعدني للصخر مما يؤدي إلى ضعفه على امتداد الكسور والفواصل ، كما يحدث على سطح اليابسة . أما التجوية الفيزيائية فقد تكون عنيفة نتيجة ارتطام الجللاميد والتصادم المستمر للحصى والرمال مما يؤدي إلى شطر الصخر وتجزئته على امتداد الكسور . ويتكسر الصخر

التي تكون معلقة في الماء وغير ملاصقة لقاع المجرى .
وحين ترسب هذه الحبيبات الصلبة فإنها تكون طميًا
alluvium ، ويشمل الطمي أى راسب فتاتي غير
متناسك ترسب من مجرى مائي . كما تحمل المجارى
المائية أيضا مواد ذائبة تسمى الحمولة الذائبة
dissolved load وهي مواد تكونت أساسا نتيجة
التجوية الكيميائية .

أ. حمولة القاع

تتراوح حمولة القاع عموما ما بين 5 إلى 50 % من
الحمولة الكلية لمعظم المجارى المائية . وتتحرك مكونات
حمولة القاع بسرعة أقل من سرعة المجرى المائي ، لأن
المكونات لا تتحرك بسرعة ثابتة ، ولكن تتحرك
المكونات بطريقة متقطعة حيث تُدفع أو تتدحرج
الحبيبات على قاع المجرى المائي . وعندما تكون القوى
كافية لرفع حبيبة ، فإنها قد تتحرك مسافة قصيرة
بالوثب ، وهي حركة وسط بين الدرجة والتعليق .
ويشمل الوثب (القفز) saltation حركة الحبيبة إلى
الإمام في قفزات قصيرة متتابعة على امتداد مسارات
مقوسة (شكل 21.12) . ويستمر القفز طالما كانت
التيارات في حالة مضطربة بدرجة كافية لرفع الحبيبات
وحملها في اتجاه المصب . ويرتبط توزيع رواسب حمولة
القاع في قناة المجرى المائي بتوزيع السرعة ، حيث يتركز
الراسب الخشن الحبيبات عند نقاط السرعة العالية ،
بينما يتعد الراسب الدقيق الحبيبات إلى نقاط السرعة
البطيئة .

1. الركيعة (المرد أو راسب حصوية مكانية)

حدث الاندفاع الشهير للبحث عن ذهب
كاليفورنيا عام 1849م بعد اكتشاف كسرات صغيرة
من الذهب في الرمال والحصى الموجودة في قاع مجرى
مائي صغير . وقد عُثر على حصى حامل للذهب في

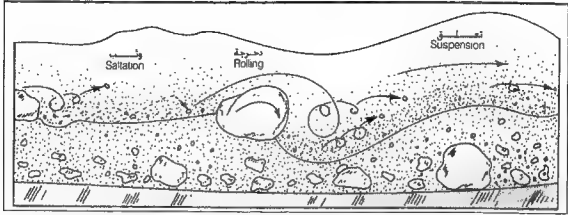
ويتميز نهر النيل شمال الخرطوم بوجود كثير من
الجنات rapids والتي تسمى بالشلالات cataracts
وعدها ستة ، يوجد آخرها عند أسوان . وجدير
بالملاحظة أن تسمية تلك الجنات بالشلالات فيه شيء
من التجاوز ، وأنه لا توجد مساقط للمياه وإنما هي
مواضع من النهر يشتد فيها انحدار مجراه وتعرضها
صخور صلبة وجنادل . وتشغل تلك الشلالات 565
كم من مجرى النيل حيث ينخفض المجرى 192 مترا
ويكون الانحدار 1:3000 .

ج. التقوض الناشئ عن تأثير التيارات

يؤدى تصادم الكميات الضخمة من الماء المندفِع
بسرعة كبيرة وبها الجلاميد المتحركة إلى تعرية طبقات
الصخور بسرعة عند قيعان المساقط المائية . وتسبب
المساقط المائية أيضاً تعرية الصخور الموجودة تحتها
والمكونة للجرف الذي يكون المساقط . ويعمل تقويض
undercutting هذه الجروف بالتعرية على انهيار
الطبقات العليا وتراجع المساقط نحو المنابع . وتكون
التعرية بالمساقط المائية أسرع عندما تكون طبقات
الصخر في وضع أفقى ، وتكون الصخور المقاومة
للتعرية عند قمة المسقط المائي بينما تكون الصخور
اللينة مثل الطفل عند أسفله . وتوضح الوثائق التاريخية
أن الجزء الرئيسى لشلالات نياجرا ، وهي أشهر
المساقط المائية في شمال أمريكا ، يتحرك في اتجاه منبع
النهر بمعدل متر واحد كل عام .

٧. حمولة المجارى المائية

تتكون النسبة الصلبة من حمولة المجارى المائية من
جزأين: يسمى الجزء الأول منها حمولة القاع bed
load ويتكون من الحبيبات الخشنة التى لا يقدر
المجرى على حملها ، فيقوم بدفعها أو دحرجتها على قاع
المجرى ، أما الجزء الثانى فيسمى الحمولة المعلقة
suspended load ويتكون من الحبيبات الدقيقة



شكل (21.12): تتحرك حولة القاع *bed load* في المجرى المائي بعدة طرق فالحيبيات الكبيرة التي لا يستطيع الماء حملها تتحرك بالانزلاق أو الدحرجة أو الوب. ويجذب الوب في المناطق التي يصل فيها اضطراب الماء إلى القاع، أو حين تصطدم الحبيبات المعلقة بالحيبيات الأخرى على القاع. وعندما ترتفع الحبيبات في الماء المنساب فإنها تنتقل على امتداد مسارات مقوسة بينما تعمل الحاذبية على سبوط الحبيبات إلى قاع المجرى المائي، حيث تصطم بحبيبات أخرى، مما يؤدي إلى تحريكها هي الأخرى.

(After Hamblin, W.K., 1985: The Earth's Dynamics Systems, 4th edition. Burgess Publishing, Minneapolis).

هذا التركيز خلف حواجز صخرية أو في حفر صخر الأساس *bedrock* على امتداد قناة المجرى المائي تحت المساطق المائية، أو في الجزء الداخلي من المنعطفات، وفي اتجاه مصب المجرى المائي في المنطقة التي يدخل فيها رافد مجرى مائي رئيسي، أو عند مصبات الأنهار في البحار. ويسمى الراسب المكون من المعادن الثقيلة والتي تم تركيزها ميكانيكياً بالركيزة *placer* (المركبة) أو رواسب حصوية مكانية). وتكون العديد من المعادن الفلزية رواسب ركيزة، وهي تشمل معادن تتواجد كفلزات نقية مثل البلاتين والنحاس، بالإضافة إلى معدن خام القصدير (كاسيتريت SnO_2) ومعادن غير فلزية مثل الماس والياقوت *ruby* (نوع من الكورندم أحمر شفاف) والفسفر (نوع من الكورندم أزرق شفاف). ولكي يتم تركيز المعادن في الركيزة، فلا يكفي أن تكون المعادن ثقيلة، ولكن يجب أن تكون أيضاً مقاومة لعوامل التجوية الكيميائية وليست معرضة لأن تتشقق بسهولة حيث إن حبيبات المعدن تتحرك (تتشقق) في المجرى المائي في كافة الاتجاهات.

مناطق أخرى كثيرة في جميع أنحاء العالم. وأحياناً يكون الحصى نفسه غنياً بالذهب بدرجة تكفي لاستخراجه منه. أما إذا كانت نسبة الذهب ضعيفة، فإن ذلك يكون دليلاً على وجود مصدر ما للذهب في اتجاه منبع المجرى المائي. وقد اكتُشف عديد من مناطق التعدين في العالم بعد تتبع أثر الذهب أو أي معادن أخرى في اتجاه منبع المجرى المائي حتى الوصول إلى مصادر المعادن في العروق في صخر الأساس.

ويركّز الذهب أو أي حبيبات معدنية ثقيلة بالتركيز الميكانيكي للحبيبات الثقيلة. فمعدن الذهب النقي يكون ثقيلًا (كثافته النوعية=19)، لذلك فإنه يترسب من حولة القاع بسرعة كبيرة جداً، بينما يتحرك الكوارتز بعيداً (كثافته النوعية=2.65). وحيث إن معظم معادن السيليكات خفيفة عند مقارنتها بالذهب، فإن حبيبات الذهب تتركز ميكانيكياً في الأماكن التي تكون فيها سرعة الانسياب في المجرى المائي عالية بدرجة تكفي لإزالة الحبيبات الخفيفة، ولكنها ليست عالية بدرجة تكفي لإزالة الحبيبات الثقيلة. ويجذب

ب. الحمولة المعلقة

ترجع الخاصية الطينية إلى كثير من المجارى المائية إلى وجود حبيبات دقيقة من الغرين والصلصال تتحرك وهي معلقة . وتأتى معظم الحمولة المعلقة من الحطام الصخري (الأديم) regolith دقيق الحبيبات والذي غُسل من مناطق غير محمية بالنباتات ، ومن الراسب الذى تم تعريته ونقله من ضفتى المجرى المائى بواسطة المجرى ذاته . فمثلا يرجع اللون الأصفر لنهر الصين الأصفر (أو هوانج هى Huang He) إلى الحمولة الكبيرة من الغرين الأصفر . وقبل إنشاء السد العالى بأسوان بمصر كان لون نهر النيل يتغير إلى اللون البنى لاحتوائه على نسبة عالية من الغرين والصلصال .

وتعمل حبيبات الغرين والصلصال لأن تبقى معلقة في الماء المضطرب فترة أطول منها في المياه غير المضطربة، حيث تزيد سرعة التيارات المتحركة لأعلى في المجرى المائى المضطرب عن السرعة التى يتم عندها ترسيب هذه الحبيبات من الغرين والصلصال تحت تأثير الجاذبية . ويحدث الاستقرار والترسيب فقط حين تنخفض السرعة ويتوقف الاضطراب ، مثلما يحدث في بحيرة أو بحر .

جـ. الحمولة الذائبة

تحتوى مياه كل المجرى المائية ، حتى أكثرها شفافية وصفاء ، على مواد كيميائية مذابة تكون جزءا من حمولة المجرى المائى . وتكون سبعة أيونات فقط كل المحتوى المذاب في معظم الأنهار وهى البيكربونات (HCO_3^-) والكالسيوم (Ca^{2+}) والكبريتات (SO_4^{2-}) والكلوريد (Cl^-) والصوديوم (Na^+) والمغنسيوم (Mg^{2+}) والبوتاسيوم (K^+) . وعلى الرغم من أن الحمولة المذابة في بعض المجرى المائية تكون نسبة صغيرة فقط من الحمولة الكلية ، إلا أنه في بعض المجرى المائية الأخرى تكون نسبته أعلى من النصف . وعموما ، فإن

نسبة الحمولة المذابة في المجرى المائية التى تتلقى إمدادات كبيرة من المياه الجوفية تكون أعلى منها في المياه التى تأتى أساسا من الماء الجارى على سطح الأرض .

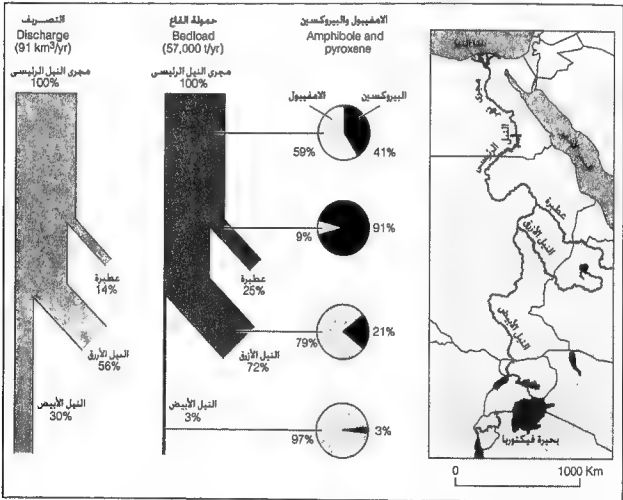
د. التغير في حجم الحبيبات وتركيب الرواسب في اتجاه مصب النهر

يرتبط حجم الحبيبات التى يمكن للمجرى المائى أن ينقلها بسرعة الانسياب . لذلك ، فإنه من المفترض أن يزيد متوسط حجم الرواسب في اتجاه مصب مجرى النهر بسبب زيادة سرعة جريان الماء ، ولكن ما يحدث في الواقع هو أن حجم الحبيبات يقل في اتجاه مصب مجرى النهر . ويرجع سبب هذه النتيجة غير المتوقعة إلى عمليتى الفرز sorting والبرى abrasion ، حيث تنساب روافد المجرى المائية للأنهار الكبيرة في المناطق الجبلية في قنوات تغطي أرضيتها بحصى خشن قد يشمل جلايد كبيرة . وحيث أن الرواسب دقيقة الحبيبات تتحرك بسهولة ، حتى بواسطة المجرى المائية ذات التصريف المنخفض ، لذلك فإنها تُحمل بعيداً بالمجرى المائية الصغيرة في المناطق الجبلية لمنايع الأنهار، تاركة الرواسب خشنة الحبيبات خلفها . ومع مرور الوقت ، فإن حمولة القاع الخشنة تقل تدريجيا في الحجم نتيجة البرى والتصادم أثناء الحركة ببطء على امتداد القاع . وفي النهاية ، وعندما يصل المجرى المائى للبحر، تكون حمولة القاع قد تكونت أساساً من رواسب لا يزيد حجم الحبيبات فيها عن حجم الرمل .

أما بالنسبة للتغير في تركيب الرواسب في اتجاه مصب النهر ، فإنه من المعروف أن المجرى المائية الكبيرة تقطع صخوراً منكشفة من مختلف الأنواع ، لذلك فإن حمولة المجرى المائى يتغير تركيب الرواسب فيها على امتداد قناة المجرى المائى ، حيث تضاف رواسب من مختلف الأنواع . ويقدم نهر النيل مثلاً جيداً لذلك ، حيث يضم مجرى نهر النيل الرئيسى

أما النيل الأزرق الذي يصرف المرتفعات الأثيوبية فإنه يساهم بأكثر من نصف التصريف الكلي ، وحوالي ثلاثة أرباع حولة القاع . وتكون نسبة الأمفيبول: البيروكسين حوالي 21:79 ، مما يعكس طبيعة الصخور البركانية لمنطقة المنبع . ويساهم نهر عطبرة بحوالي 14٪ من التصريف وحوالي ربع حولة القاع . ويسود معدن البيروكسين في هذا المجرى المائي حيث تبلغ نسبة الأمفيبول إلى البيروكسين 9:91 . وتختلط هذه النسب

خلال جريانه من الجزء الجنوبي بمصر إلى الدلتا ماء يرد إليه من ثلاثة ووافد رئيسية هي النيل الأبيض والنيل الأزرق ونهر عطبرة (شكل 22.12). ويساهم النيل الأبيض بحوالي ثلث التصريف الكلي discharge total تقريباً ، وحوالي 3٪ من حولة الرواسب في مجرى النيل الرئيسي . وتساوى نسبة معدن الأمفيبول (والذي جُزئ من الصخور المتحولة في هضبة وسط أفريقيا) إلى البيروكسين حوالي 3:97 ،



شكل (22.12) التغير في تركيب الرواسب على امتداد نهر النيل ، حيث تؤدي مساهمات الروافد من المعادن المختلفة في تغيير تركيب الرواسب في مجرى النهر الرئيسي .

(أ) خريطة لنهر النيل وروافده الرئيسية

(ب) التصريف discharge وحمولة القاع bed load ونسبة الأمفيبول / البيروكسين في نهر النيل وروافده الرئيسية . ويساهم نهر النيل الأزرق الذي ينشأ من المرتفعات الأثيوبية بأكثر نسبة من التصريف وحمولة القاع .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

النقص المفاجئ في العوامل السابقة إلى ترسيب الجزء الخشن من الحمولة المعلقة (عادة رمل ناعم وغرين خشن) على امتداد مساحة طويلة ضيقة (شقة) على حواف القناة ليتكون بهذه الطريقة الجسر الطبيعي، بينما يترسب بعيداً الغرين الأدق حجماً والصلصال في الماء الساكن الذي يغطي السهل الفيضي .

وقبل بناء السد العالي بأسوان كان الغرين المترسب في أوقات الفيضان يغطي السهل الفيضي لنهر النيل . ويبلغ أقصى عرض للسهل الفيضي 23 كم عند مدينة بنى سويف ، بينما لا يوجد سهل فيضي عند أسوان . ويزداد عرض السهل الفيضي عموماً كلما اتجهنا شمالاً (جدول 1.12) . ويلاحظ أن عرض السهل الفيضي غير متاثل على جانبيه مجرى نهر النيل، وأنه عموماً أعرض على الجانب الغربي عنه على الجانب الشرقي ، فيها عدا منطقة قنا .

ب. الشرفات (المصاطب النهرية)

تشتمل معظم وديان المجارى المائية على امتدادات طويلة من الأرض على جانب النهر، تكون على هيئة مصاطب طمية مستوية أعلى السهل الفيضي تعرف بالشرفات (شكل 23.12). وتوجد عادة شرفة مزدوجة واحدة على كل جانب من جوانب المجرى المائي ، ويكون منها في الغالب عدة أزواج ومجرى النهر محصور بين الزوج الأسفل منها . والشرفة (المصطبة النهرية) terrace هي بقايا سهل فيضي مهجور ، وتتكون عموماً من رواسب الفيضان .

المختلفة من المعادن مع بعضها عند دخولها المجرى الرئيسى للنيل لتعطي نسبة أمفيبول : بروكسين 41:59 . وتعكس هذه النسبة بدرجة كبيرة الإضافة الرئيسية لراسب غنى بالأمفيبول من النيل الأزرق ، والذي يؤثر على الراسب في مجرى النيل الرئيسى .

VI. رواسب المجارى المائية

عندما يفقد مجرى مائي طاقة حركته نتيجة التغير في الانحدار أو السرعة أو التصريف، تضعف قدرته على النقل ، ويرسب جزءاً من حمولته . وتتكون رواسب مميزة في المجارى المائية على امتداد حواف قناة المجرى وقيعان الوادى ومقدمات الجبل وحافة البحيرة أو المحيط ، حيث إنها تمثل الأماكن التى تحدث فيها تغيرات في طاقة المجرى المائي .

أ. السهول الفيضية والجسور الطبيعية

عندما يرتفع منسوب الماء في المجرى المائي أثناء فيضان عال ، فإن الماء فيفيض ويغمر ضفتي المجرى ويغرق السهل الفيضي floodplain المجاور ، وهو جزء مسطح مستوى من وادى المجرى المائي تغمره مياه الفيضان . وقد يتكون عند الحد بين قناة المجرى المائي وسهل الفيضان جسر طبيعى natural levee (شكل 16.12) ، وهو أرض مرتفعة نسبياً وتدية الشكل ، تمتد في مساحة ضيقة على طول حافة قناة المجرى ، وهو يمثل أعلى جزء في السهل الفيضي . ويتكون الجسر الطبيعي عندما يفيض الماء المحمل بالرواسب خارج قناة المجرى المائي المغمورة تماماً أثناء الفيضان ، حيث يحدث نقص مفاجئ في السرعة والعمق والاضطراب عند حواف القناة . ويؤدى

جدول (1.12): عرض ومنسوب السهل الفيضي Floodplain لنهر النيل بمصر

المنطقة	خط العرض	النسب بالأمتار (فوق مستوى سطح البحر)	عرض السهل	
			الجانب الغربي	الجانب الشرقي
أسوان	24° 05'	92 - 91	0.0	0.0
إدفو	25° 00'	84 - 82	4.0	2.0
قنا	26° 10'	81-72	1.0	8.0
أسيوط	27° 10'	52-51	7.0	1.0
المنيا	28° 05'	40-39	11.0	1.5
بنى سويف	29° 05'	29-28	22.0	1.0
القاهرة-الجيزة	30° 00'	20-18	10.5	2.0

(After Embabi, N. S., 2004: The Geomorphology of Egypt: Landforms and Evolution, vol. 1. The Egyptian Geographic Soc., Cairo).

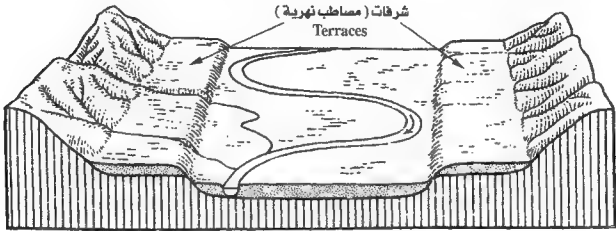
في الظروف عند مقدمة الجبل وترسب على امتداد هذه المقدمة كميات كبيرة من الرواسب على هيئة تراكبات مروحية أو مخروطية الشكل ، تسمى مراوح طميية (فيضية) **alluvial fans** (شكل 24.12). ويتبع هذا الراسب عن الانخفاض المفاجئ في سرعة جريان الماء بسبب اتساع عرض المجرى المائي كثيرا وانخفاض شدة الانحدار عند مقدمة الجبل . وتأخذ المروحة الطميية (الفيضية) شكلا محدبا لأعلى يصل بين الجزء المنحني الذي يمثل أشد انحدارًا للجبل من ناحية ومنحنى الوادي اللطيف الانحدار أو السهل من ناحية أخرى . وتسود المواد الخشنة من الجلاميد إلى الرمل على المنحدرات الحادة العلوية من المروحة ، بينما تتكون الرواسب السفلية من رمال أكثر دقة وجرين وصلصال . وقد تتكون على مقدمة الجبل مراوح طميية (فيضية) أخرى من مجارى مائية مجاورة تتصل معا لتكوّن ما يسمى بالبهادا bajada والتي تمتد عند حضيض الجبال بشكل طولي . مثال ذلك النطاق الذي يمتد عند أقدام جبال الصحراء الشرقية في مصر مكونا الحد الشرقي للسهل الفيضي . وتكون هذه المناطق غنية بالمياه الجوفية نظرا لوجودها عند مخارج الأودية من ناحية وخشونة وراسبها من ناحية أخرى .

ويبدأ تكوّن الشرفات عندما يكون المجرى المائي سهلا فيضيا . وقد يحدث تغير في توازن المجرى المائي مما يؤدي لأن يقطع المجرى المائي السهل الفيضي عند مستوى أقل انخفاضاً ، حتى يصل إلى مستوى لا يستطيع الفيضان فيه أن يصل إلى السهل الفيضي السابق . ويعيد المجرى المائي توازنه مرة أخرى عند المستوى المنخفض . وقد يكون المجرى المائي سهلا فيضيا آخر ، يؤدي إلى تكون زوج آخر من الشرفات المنخفضة .

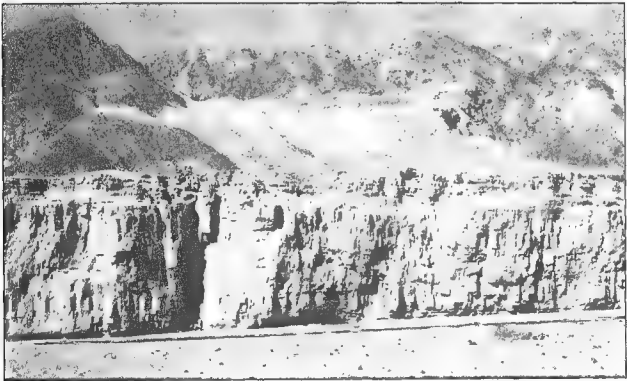
وقد أوضحت الدراسات وجود سلسلة من الشرفات على جانبي وادي النيل مكونة من الحصى . وقد كونت الأنهار المتعاقبة الشرفات منذ زمن البليوسين المتأخر . هذا ولم تحفظ شرفات نهر النيل في كل مكان على جانبي الوادي . وقد أزيلت بعض هذه الشرفات بالأنهار المتعاقبة ، بينما لم يتكون بعضها الآخر من البداية .

ج. المراوح الطميية (الفيضية)

عندما تنساب مجارى مائية في وديان ضيقة وشديدة الانحدار في المناطق الجبلية ، ثم تنبثق فجأة إلى وديان ميسطة القاع نسبيا أو مناطق سهلية ، فإنه يحدث تغير



ا



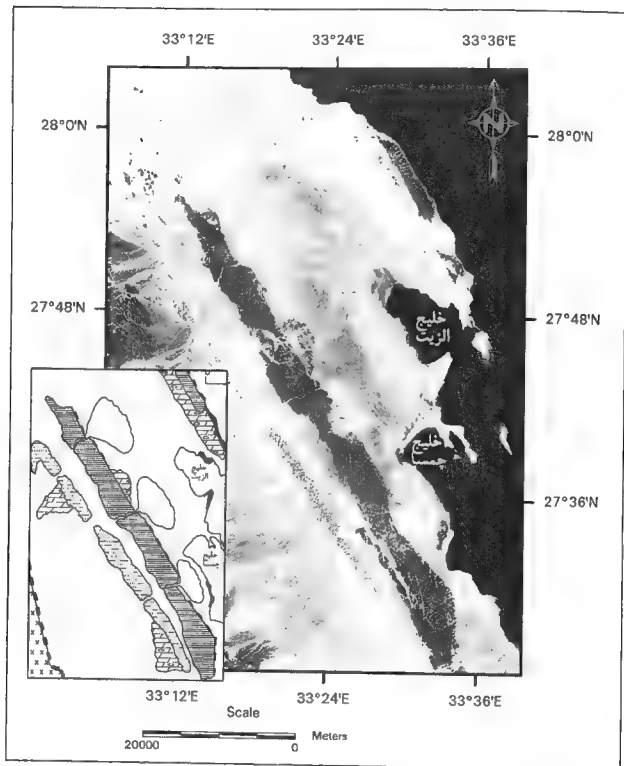
ب

شكل (23.12): الشرفات (المصاطب النهريّة) terraces

(أ) شرفات (مصاطب نهريّة) terraces المجري المائي، وهي مصاطب طميية (فيضية) تغطي صخر الأساس bedrock، وتكون عندما يقطع المجري المائي سهلا فيضيا، ويمثل السطح العلوي للشرفات النهريّة قاع واد سابق. وتكون مزدوجة عادة على جانبي المجري المائي.

(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

(ب) الشرفات (المصاطب النهريّة)، غرب نويج - سيناء - مصر - (أ.د. محمود عبد الغفور حسن، هيئة المواد النووية - مصر).



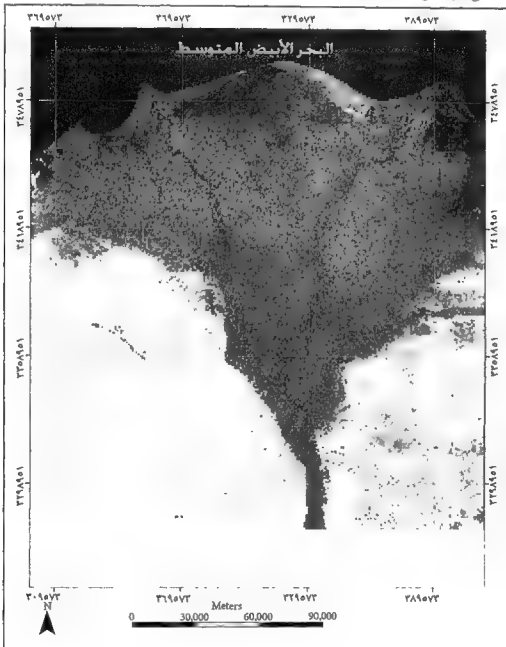
شكل (24.12): صورة فضائية لثلاث مراوح فيضية alluvial fan متماثلة تكونت نتيجة النقص المفاجئ في سرعة جريان المياه بسبب اتساع المجرى المائي وقلة شدة الانحدار عند مقدمة الجبل على امتداد الحد الشمالي الشرقي لجبال عيش الملاحه - الصحراء الشرقية - بمصر .

تصطدم بالأمواج القوية .

د. الدلتاوات

وتتلاشى تدريجياً تيارات المجرى المائي عندما تلتقى بمياه البحر أو البحيرة وتفقد قدرتها على نقل الرواسب كلها تقدمت إلى الأمام ، وتبدأ حولة النهر في الترسيب حسب حجم الحبيبات من الخشن إلى الناعم . فتبدأ الرمال الخشنة في الترسيب أولاً عند المصب تليها الرمال الدقيقة الحبيبات ثم الغرين فالصلصال بعيداً عن الشاطئ . وتكوّن كل هذه الأحجام المختلفة من

عندما تنساب الأنهار أو المجارى المائية عموماً في مياه البحار أو المحيطات أو البحيرات فإنها تحتلظ مع المياه المحيطة وتنخفض سرعتها بدرجة كبيرة وتفقد تدريجياً طاقة حركتها . وتستطيع بعض الأنهار الكبيرة مثل الأمازون والميسيسيبي أن تحتفظ ببعض التيارات لعدة كيلومترات في البحر ، بينما تختفى تقريباً تيارات بعض الأنهار مثل نهر النيل عند المصب مباشرة ، حيث



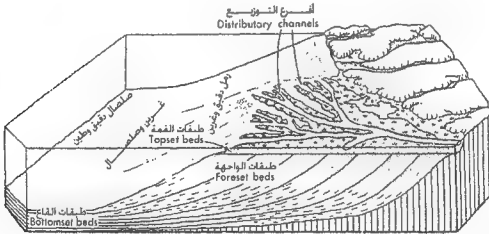
شكل (25.12): صورة فضائية لدلتا نهر النيل - مصر.

سد أو جسر ينمو بإطراف ناحية البحر (شكل 26.12). ويسمى الجزء السميك من الطبقة المترسبة من الدلتا والمنحدر بشدة والذي يتميز بحيياته الخشنة بطبقة الواجهة **foreset bed**. وتتغير سحنة هذه الطبقة لتصبح حيياتها أدق حجماً كلما تحركنا من الشاطئ ناحية البحر، ويغطي هذا الجزء من طبقة الدلتا مساحة واسعة من القاع، ويطلق عليه طبقة القاع **bottomset bed**.

ومع استمرار الترسيب تنمو الدلتا للخارج، حيث تتراكب طبقات الواجهة الخشنة الحبيبات فوق طبقات القاع دقيقة الحبيبات. وهكذا، تمتد قناة النهر تدريجياً للخارج لتتراكب فوق الدلتا النامية. وتسمى كل من الرواسب خشنة الحبيبات والرواسب دقيقة الحبيبات المترسبة بين القنوات بطبقات القمة **topset beds**. وتتراكب طبقات القمة والتي تكون في وضع أفقي تقريباً فوق طبقات الواجهة في الدلتا (شكل 26.12).

المواد المترسبة جسماً مسطحاً تقريباً (رصيف ترسيبي) عند مصب المجرى المائي على قاع البحر أو البحيرة الذي ينحدر نحو المياه العميقة بعيداً عن الشاطئ. ويشبه هذا الجسم المسطح المثلث أو المروحة ويطلق عليه مصطلح دلتا **delta**. ويرجع اسم الدلتا إلى المؤرخ اليوناني هيرودوت الذي زار مصر حوالي سنة 450 قبل الميلاد، وأطلق هذا الاسم على الشكل شبه المثلث لدلتا نهر النيل لتشابهه مع الحرف اليوناني دلتا (Δ). وتستمد كل الدلتاوات الأخرى في العالم اسمها من دلتا نهر النيل (شكل 25.12).

وكما سبق أن أوضحنا، فإن ماء النهر المندفع عندما يلتقى بماء البحر أو البحيرة فإن حبيبات حولة القاع ترسب أولاً، ثم تتبعها الرواسب العالقة. ولذلك، تندرج الطبقة التي تمثل حدثاً ترسيبياً واحداً (مثل فيضان واحد) من رواسب خشنة عند مصب النهر إلى رواسب أدق في حجم الحبيبات بعيداً عن الشاطئ. ويؤدي تراكم عديد من الطبقات المتتابعة إلى تكوين



شكل (26.12): دلتا بحيرة نموذجية

يعرف الجزء السميك المنحدر بشدة للخارج في كل طبقة من طبقات الدلتا والذي يتكون من حبيبات خشنة (الرمل) بطبقة الواجهة **foreset bed**. وعند تنبع الطبقة نفسها في اتجاه البحر فإنها تصبح أقل سمكاً، كما تصبح حيياتها أدق حجماً (غرين وصلصال) وتغطي مساحة كبيرة من قاع البحر، ويسمى هذا الجزء من الطبقة في الدلتا والذي ينحدر بلطف بطبقة القاع **bottomset bed**. وتتراكب فوق طبقات الواجهة رواسب خشنة دقيقة الحبيبات تعرف بطبقات القمة **topset beds**.

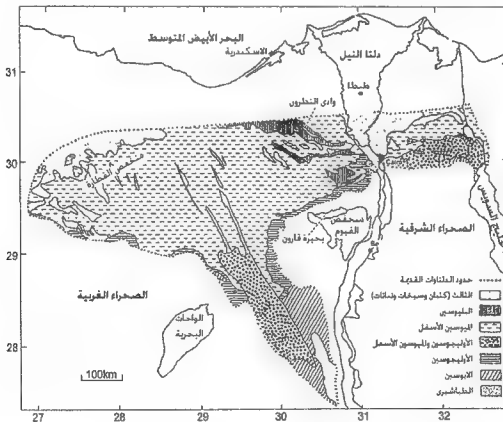
(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وطبيعة وحجم الحمولة وشكل صخر الأساس الساحلى بالقرب من الدلتا وطوبوغرافية المنطقة المغورة على مسافة من الشاطئ وشدة واتجاه التيارات والأمواج . وتنقل معظم الأنهار والمجارى المائية الكبيرة كميات ضخمة من الرواسب العالقة الدقيقة إلى البحر .

ومن الظواهر المهمة في تكوين الدلتاوات تغير المجرى الكلي للنهر. فإذا لم تستطع أفرع النهر الوصول إلى المحيط بسبب نقص الانحدار وقدرة النهر على الانسياب التدريجي، فإن النهر يبدأ في تحويل مساره إلى مجرى جديد أقل طولاً، ويقتل هذا المجرى الجديد بالتالي الرواسب إلى الموضع الجديد. ونتيجة لهذا التغير، فإن الدلتا قد تنمو في مكان ما لمئات أو آلاف

وعندما يقترب النهر من مصبه عند الدلتا، حيث يكون الانحدار مستويًا تقريباً مع مستوى سطح البحر، فإن نمط الصرف ينعكس، أي تتحول من تجميع المزيد من الماء من الروافد **tributaries**، إلى تكوين نمط **distributaries** التوزيع، والذي يكون عبارة عن أنهار صغيرة تتفرع من القناة الرئيسية إلى المصب. وهكذا تستقبل أفرع التوزيع الماء والرواسب من القناة الرئيسية وتوزعها في عدة قنوات - أي أنها تعمل عكس عمل الروافد.

وقد كون عديد من الأنهار الكبيرة في العالم دلتاوات ضخمة عند مصباتها، مثل أنهار النيل والأمازون والميسيسيبي. ولكل دلتا مميزاتا الخاصة، والتي تحددها بعض العوامل مثل تصريف النهر



شكل (27.12): دلتا الأوليجوسين في الجزء الأوسط من الصحراء الغربية.

(After Abdel-Rahman, M.A. and El-Baz, F., 1979: Deposition of a probable ancestral delta of the Nile River, in Apollo-Soyuz Test Project, V. II, Earth observations and photography (Editors: F. El-Baz and D.M. Warner) NASA, Washington DC, pp. 511-520.

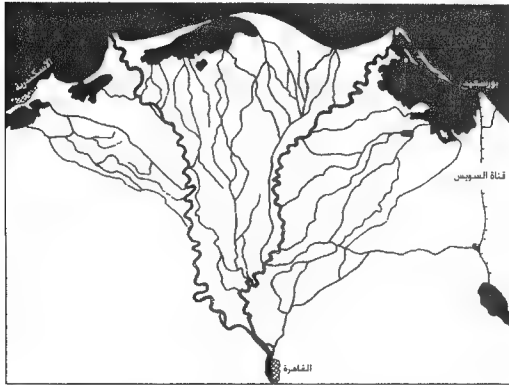
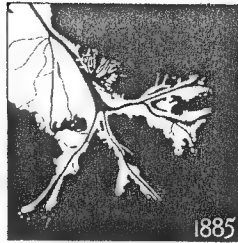
والسدوات. ويسود في دلتا المسيسيبي عمليات الترسيب النهرية (شكل 28.12 أ)، حيث تُغذّى الدلتا بنظام نهرى ضخم يقوم بصرف جزء كبير من شمال أمريكا، ويبلغ تصريف حمل التصريف السنوى حوالى 454 مليون طن مكعب سنويا. ويحصر نهر المسيسيبي عموماً في قناته على طول مساره باستثناء فترات الفيضان العالية. وتصل معظم رواسبه إلى المحيط عبر قنوات فرعين أو ثلاثة أفرع، والتي امتدت بسرعة بعيداً في خليج المكسيك. ويطلق على هذا الامتداد دلتا قدم الطائر *bird-foot delta*.

وتختلف دلتا النيل بمصر عن دلتا المسيسيبي في عدة جوانب. فبدلاً من أن يكون النهر محصوراً في قناة واحدة، فإن نهر النيل يبدأ في التفرع عند القاهرة (قبل 160 كم من البحر) ثم يكوّن شكل المروحة على طول امتداد الدلتا (شكل 28.12 ب). وقد كان للنيل تسعة أفرع ثم أصبحت سبعة وأخيراً اقتصرت على فرعى دمياط ورشيد. وقد أعادت أمواج البحر المتوسط القوية توزيع الرواسب عند واجهة الدلتا. وتكوّن هذه الرواسب التى أعيد ترسيبها مجموعة من الحواجز المقوسة التى تحجز أجزاء من البحر لتكوّن بحيرات شاطئية *lagoons*. وتقوم البحيرات الشاطئية بدور مهم في تكوين بيئة ترسيب تملئ برواسب دقيقة الحبيبات. ويرجع الاختلاف بين دلتا النيل ودلتا المسيسيبي إلى التوازن بين تدفق الرواسب، والذي يقوم بتكوين دلتا قدم الطائر، وبين قوة تأثير الأمواج التى تعيد ترسيب الرواسب لتكوين حواجز. وتقدم دلتا النيجر أوضح مثال على التوازن بين قوة الترسيب وفعل الأمواج وتيارات المد والجزر، ولذلك فإن دلتا النيجر تكون متماثلة بشكل لافت للنظر.

السنين، ثم تتحول إلى موضع جديد وتبدأ في النمو في اتجاه آخر. وتكوّن الأنهار الكبيرة، مثل نهر المسيسيبي أو نهر النيل، دلتاوات كبيرة تبلغ مساحتها عدة آلاف من الكيلومترات المربعة. وقد نمت دلتا المسيسيبي مثل العديد من دلتاوات الأنهار الكبيرة الأخرى خلال ملايين السنين، حيث بدأت في التكون منذ حوالى 150 مليون سنة مضت. وقد تغير موضع دلتا المسيسيبي خلال الستة آلاف سنة الماضية. كما تغير موضع دلتا النيل أيضاً كما سنوضح فيما بعد. كما نشأت بعض الدلتاوات في مصر أنهار سابقة لنهر النيل وغيرت موضعها أيضاً. فقد أوضحت الأبحاث الحديثة أنه كان يجرى على أرض الصحراء الغربية بمصر منذ الأليجوسين عدة أنظمة نهرية وليس نظاماً نهرياً واحداً، والتي تعرف بالأنهار أسلاف النيل Nile Ancestors. فقد نشأ في حين الأليجوسين نظاماً نهرياً ينساب في اتجاه شمال غرب، حيث كون رواسب دلتاوية في الجزء الأوسط من الصحراء الغربية (شكل 27.12). ثم سادت ظروف مشابهة لتلك الظروف أيضاً في حين الميوسين المبكر والأوسط. وقد أدى تكون ذلك إلى تكون دلتا ضخمة في الجزء الشمالى من منخفض الفيوم، كانت أكبر كثيراً من دلتا النيل الحالية، مما يدل على أن النهر كان قوياً (شكل 27.12). وعلى الرغم من تحديد تلك الدلتاوات، إلا أنه من الصعب التعرف على أثر مجارى الأنهار التى كونت تلك الدلتاوات، حيث محيت وأزيلت كلية بالتجوية والتعرية في الميوسين، باستثناء القليل من الأدوية التى حفظت منها.

أمثلة من الدلتاوات الحديثة

يوضح شكل (28.12) أنواعاً مختلفة من الدلتاوات، حيث يتحكم في كل دلتا توازن محدد بين قوى الترسيب والعمليات البحرية مثل الأمواج



ب

شكل (28.12): أشكال بعض الدلتاوات المعروفة

(أ) شكل يوضح نمو دلتا الميسيسيبي خلال فترة خمسين سنة ، وهي مثال تقليدي لدلتا ندم الطائر bird-foot delta .
(ب) دلتا نهر النيل (يظهر الشكل بعض أفرع الدلتا القديمة) ، وهي مثال تقليدي للدلتا القوسية . arcuate delta ويظهر في الشكل بعض أفرع الدلتا القديمة .

(After Holmes, D.L., 1984: Holmes Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson. Great Britain).

VII. أنظمة الصرف

نظام محكم ، حيث لاتتوزع المجارى المائية على سطح الأرض عشوائياً ، وإنما تترتب فى أنظمة صرف معقدة ، وتدلنا بعض هذه الأنظمة على الطبيعة الجيولوجية

يعتقد بعض سكان المدن ، والذين اعتادوا على بيئة بها منشآت صناعية ، أن الطبيعة ينقصها النظام أو النمط الواضح . وفى الحقيقة ، فإن الطبيعة يحكمها

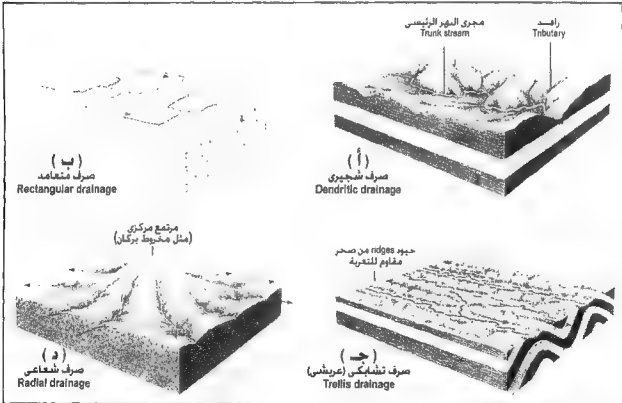
وصفات الأرض من تحتها ، وكذلك تطور القارات .

أ. أحواض الصرف وخطوط تقسيم المياه

يُحاط كل مجرى مائي بحوض صرف drainage basin. وحوض الصرف هو المساحة الكلية التي تتجمع مياهها وأمطارها لتغذي المجرى المائي . ولكل مجرى مائي حدود عند أطرافه ، قد تكون بعيدة أو قريبة من مجراه ، تعرف بمقسم المياه divide water ، وهي عادة جبال أو تلال مرتفعة تفصل بين حوض هذا المجرى المائي بروافده وحوض مجرى مائي آخر مجاوره. ويتراوح حجم هذه المقسمات بين تل منخفض يفصل بين جدولين صغيرين ومقسمات الماء القارية التي تفصل بين أحواض الصرف القارية الضخمة . ويتراوح حجم أحواض الصرف بين أقل من كيلومتر مربع واحد ومساحات شاسعة . وتصل مساحة

حوض نهر النيل الضخم إلى حوالى مليونين وتسعمائة ألف كيلومتر مربع . وتقسم القارات عموماً إلى أحواض صرف أساسية تفصل بينها مقسمات ماء أساسية . فقارة أفريقيا مثلاً مقسمة إلى العديد من أحواض الصرف .

وتحتفظ معظم مقسمات المياه بأماكنها لفترات زمنية طويلة ، حيث يتم تعريتها لتكوّن حدوداً منخفضة ، بينما تتغير أماكن المقسمات في مناطق أخرى . فإذا كان أحد المجارى المائية على جانب مقسم مياه قادراً على تعرية ونقل الرواسب بسرعة أكبر بكثير من مجرى مائي على الجانب الآخر ، فإن المقسم يتم تعريته بطريقة غير متساوية . وفي بعض الأماكن ، ينفذ المجرى المائى الأكثر نشاطاً خلال المقسم ليقوم بأسر كل أو جزء الرافد المجاور الأقل نشاطاً ، وتعرف هذه الحالة



شكل (29.12) شبكات الصرف drainage networks التوضيحية

(أ) صرف شجري (ب) صرف متعامد (ج) صرف تشابكي (عريشى) (د) صرف شعاعي

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

بأن المصارف الرئيسية وروافدها بها عديد من الانحناءات المتعامدة ، حيث تتبع عادة كسورا أو فواصل في صخر الأساس تقسمه إلى كتل مستطيلة الشكل تقريباً ، وهي التى تتبعها اتجاهات الوديان . وهناك نوع خاص من نظام الصرف المتعامد ، يعرف بنظام الصرف التشابكى (عريشى) **trellis**

drainage . وفى هذا النظام، تكون الروافد الرئيسية متوازية وطويلة جداً مثل شجرة العنب الممتدة على تعريشة من الخشب، والتي يصب فيها روافد أصغر متعامدة عليها ومتوازية فيما بينهما . وهذا النظام من الروافد يكون شائعاً في المناطق التى تتبادل فيها مكاشف أحرف الصخور الرسوبية المطوية الصلبة مع أخرى رخوة يسهل تأكلها وتعرضها للتعرية لتكون أحزمة متوازية تقريباً . ومن أنظمة الصرف الأخرى نظام الصرف الشعاعى **radial drainage** وهو يتكون عندما تمتد المجارى المائية متباعدة عن بعضها البعض في نظام شعاعى من نقط مركزية مرتفعة ، مثل مخروط البركان أو تركيب القبة .

جـ. أنماط الصرف والتاريخ الجيولوجى

تقدم العلاقة بين المجارى المائية وجيولوجية المنطقة معلومات عن التاريخ التركيبى لتلك المنطقة (شكل 30.12) . فقد يتبع مسار المجرى المائى انحدار سطح الأرض ويعرف بالمجرى الانحدارى **consequent stream** ، بينما يقع المجرى اللاحق **subsequent stream** على امتداد أحزمة الصخور الضعيفة أو يمتد في مجرى تكون نتيجة تركيب جيولوجى . ويسير المجرى المناضل أو السالف **antecedent stream** على المرتفعات حيث يقطع صخور الأساس المكونة لها والمقاومة للتعرية ، بدلاً من الجريان على جوانب تلك المرتفعات . ويسمى هذا المجرى ملتزماً لوجوده قبل

بالقرصنة النهرية **stream piracy** . ويتم خلال هذا الأسر أو القرصنة النهرية تحويل مياه نهر ما إلى مجرى نهر آخر له سرعة تعرية أكبر كما ذكرنا ، ويجرى في مستوى أكثر انخفاضاً من النهر المأسور . وتحدث القرصنة النهرية بسبب وجود وديان ضيقة بمناطق لا تناسب خلالها أى مجارى مائية.

ب. أنماط الصرف

إذا نظرنا إلى أى خريطة توضح توزيع قنوات المجارى المائية الكبيرة والصغيرة والروافد والأنهار الأساسية ، فإننا سنجد أنها تحتوى على نظام من الارتباط يعرف بشبكات الصرف **drainage networks** أو أنظمة الصرف **drainage systems** . فإذا تتبعنا المجرى الرئيسى ، فسنجد أنه ينقسم إلى روافد أصغر فأصغر في شبكات صرف توضح أنماط تفرع مميزة (شكل 29.12) . والتفرع صفة تميز الكثير من الشبكات التى تقوم بجمع أى مادة وتوزعها . فشبكة الدورة الدموية في الإنسان تقوم بتوزيع الدم إلى الجسم في نظام متفرع من الشرايين ، ثم تقوم بجميعه مرة أخرى في نظام من الأوردة .

وربما كانت أكثر الشبكات المتفرعة شيوعاً هى تلك الموجودة في الأشجار . وتتبع معظم الأنهار نمط التفرع غير المنتظم نفسه والذي يسمى صرف شجري **dendritic drainage** (من الكلمة اليونانية **dendron** بمعنى شجرة) . وهذا النموذج العشوائى من نظم الصرف موجود في المناطق التى يكون فيها صخر الأساس **bedrock** متجانساً ، مثل طبقات من الصخور الرسوبية في وضع أفقى ، أو صخور نارية أو متحولة كتلية (خالية من التطبق أو الانفصام أو التورق) . ويتكون نظام الصرف المتعامد **rectangular drainage** من مجارى مائية تتميز

طوبوغرافية المنطقة. أما المجرى المتراكب **superposed stream** فإنه مجرى مائي نحت مجراه عبر مجموعة من الصخور حتى وصل إلى مجموعة أخرى تحتها تختلف في خواصها الصخرية أو التركيبية. وقد تحدث نمط الصرف الأصلي للمجرى المائي عند نحتة للمجموعة العلوية وليس تبعاً للمجموعة التي ينساب الآن خلالها. فقد تكون صخور المجموعة العلوية متجانسة لتكوّن نظام الصرف الشجري ثم يفرض هذا النظام على صخور المجموعة السفلية والتي قد يكون نظام الصرف بها متعامداً عند تكونه.

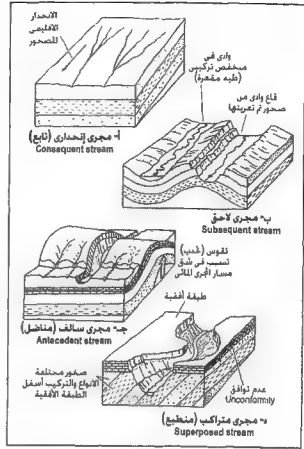
VIII. نهر النيل بمصر

يلعب نهر النيل دوراً مهماً في مصر، حيث يعد هذا النهر مصر بحوالي 98٪ من احتياجاتها بالماء. ويمثل نهر النيل ظاهرة جغرافية وجيولوجية مميزة. حيث يجري من منابعه الاستوائية في قلب أفريقيا، ثم يتجه شمالاً إلى البحر المتوسط ملتزماً بهذا الاتجاه. ولا يجرى نهر النيل في إقليم طبيعي واحد مثل نهر الأمازون، بل يجري في عدة أقاليم متباينة، ويشتق حوالي 35° من درجات العرض ليصل بين منابعه ومصبه.

ويحمل نهر النيل حوالي 86 بليون متر مكعب من المياه سنوياً، مما يجعله أحد أصغر الأنهار في العالم، على الرغم من حوضه الكبير (3000000 كم²) وطوله الذي يصل إلى 6825 كم. وبين جدول (2.12) مقارنة بين نهر النيل وبعض الأنهار الرئيسية في العالم.

أ. نشأة وتطور نهر النيل

نشأ نهر النيل قبل نحو 6 ملايين سنة مضت. وبالطبع فإن شكل نهر النيل الحالي هو شكل حديث نسبياً، وصل إليه النيل بعد سلسلة طويلة من التغيرات استغرقت عمر نهر النيل نفسه. ويعتبر نهر النيل نهرًا



شكل (30.12): تقدم العلاقة بين المجارى المائية وجيولوجية المنطقة التي تجري بها معلومات من التاريخ التركيبي لتلك المنطقة. أ. مجرى إحداري (تابع) consequent stream، حيث يتبع مسار المجرى المائي انحدار سطح الأرض

ب. مجرى لاحق subsequent stream، حيث يجري المجرى المائي على امتداد أحزمة الصخور الضعيفة أو في مجرى مائي تكون نتيجة لتركيبة جيولوجية

ج. مجرى سالف (مناضل) antecedent stream، حيث يحافظ المجرى المائي على مجراه عبر الصخور التي ارتفعت لتعترض طريقه بدلاً من الجريان على جوانب تلك المرتفعات.

د. مجرى متراكب superposed stream، وهو مجرى مائي نحت مجراه عبر مجموعة من الصخور حتى وصل إلى مجموعة أخرى تختلف في خواصها الصخرية والتركيبية. وقد تحدث المجرى الأصلي للمجرى المائي عند نحتة للمجموعة العليا وليس تبعاً للمجموعة التي ينساب خلالها حالياً.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

تكوّن المرتفع الحالي، وأنه حافظ على مجراه الأصلي والتزم به على الرغم من التغيرات في الصخور أو في

جدول (2.12): النيل مقارنة بأنهار العالم .

النهر	الطول (كم)	مساحة الحوض (بالآلاف كم ²)	التصريف (بالليون م ³ /سنة)	التصريف في وحدة المساحة (م ³ /ثانية لكل ألف كيلو متر مربع)
النيل	6825	2960	84	0.86
الأمازون	6700	7050	5518	24.80
الكونغو	4700	3820	1248	10.40
هوانج هي	4630	673	123	2.23
ميكونج	4200	795	470	13.84
النيجر	4100	1220	192	5.74
المسيبي	3970	3270	562	5.66
الدانوب	2900	816	206	7.80
الزيمبيزي	2700	1200	223	5.90
الراين	1320	224	70	9.80

(المصدر: سعيد، رشدي، 1993م . نهر النيل: نشأته واستخدام مياهه في الماضي والمستقبل، دار الهلال) .

(Eonile)، خانقا عظيما . وقد تغطى هذا الخانق بقاء البحر الأبيض المتوسط عندما عاد وأمتلا البحر بالماء منذ حوالي 5.4 مليون سنة . وقد أصبح الخانق خليجا بحريا لأكثر من مليوني سنة استقبل بعدها نهرا هائلا أطلق عليه النيل القديم الباليونيل (Paleonile)، حيث امتلا الخانق بالرواسب . ويبدو أن كلا النهرين السابقين كان ينبعان محليا من هضاب مصر والنوبة، ولم يكن لهما أى اتصال بأفريقيا . وقد انتهت تلك الفترة من تاريخ النيل منذ حوالي 2 مليون سنة مضت . وقد مرت فترة طويلة قبل أن يتصل النهر المصرى بأفريقيا الاستوائية منذ حوالي 800000 سنة، حيث وصل النهر من أفريقيا والذي يسمى نهر ماقبل النيل (البرينيل Prenile)، والذي كان ينبع من منطقة منابع النيل الحديثة التي تغيرت تضاريسها لتتقارب شكلها الحديث، فتحول تصريف أنهارها إلى حوض النيل . وتمثل تلك الفترة أول اتصال بمصادر المياه في المرتفعات الأنثوية، كما غيزت تلك الفترة بتحول مياه

مركبا تكون نتيجة اتصال عدد من الأحواض الداخلية المنفصلة التي تكونت في العصر المطير الذي تلا تراجع ثلوج العصر الجليدى الأخير منذ ما يقرب من عشرة آلاف عام .

وقد حفر النيل مجراه بعد أن جف حوض البحر الأبيض المتوسط، ثم تحول هذا الحوض إلى صحراء جرداء منذ 6 مليون سنة عندما أغلق مضيق جبل طارق، والذي يربط البحر المتوسط بالمحيط الأطلنطي. وقد كانت مصر معزولة عن أفريقيا خلال تلك الفترة بهضبة النوبة المرتفعة، كما لم يكن لأنهارها أى اتصال بالجنوب (جدول 3.12) .

وقد تراوح عمق البحر المتوسط الجاف بين ثلاثة وأربعة كيلومترات، مما دفع الأنهار القليلة التي كانت تصب فيه إلى أن تعمق مجراها إلى هذا العمق . وقد وصل عمق مجرى النيل إلى 4 كم في الشمال وشكل هذا النهر، والذي يسمى بنهر فجر النيل (الإيونيل

الذي يمتد حتى وقتنا الحالى أهمية خاصة ، لأنه شهد كل تاريخ الإنسان على أرض مصر والذي ظهر مع بدء هذا النهر .

ومنذ حوالى 10000 سنة من الآن زادت الأمطار على الهضبة الأثيوبية بل ومنطقة الساحل الأفريقى الشرقى كلها ، كما امتدت جبهة المطر شمالا حتى غطت شمال السودان وجنوب مصر ، وظلت تلك المناطق مطيرة لمدة 4500 سنة . ويوصل المياه بغزارة من المرتفعات الأثيوبية وهضبة البحيرات ولد النيل الحديث الذى أصبح مستديها بعد أن كان فصليا . وقد زادت أمطار شمال السودان وجنوب مصر من مياه النهر في فترته الأولى ، حيث ارتفع منسوب النهر وبدأ في ترسيب الرواسب التى كان يحملها في واديها ودلتاه

النيل إلى منخفض الفيوم لتكون بحيرة . وقد حملت مياه نهر ما قبل النيل كميات هائلة من الرمل والحصى رسبها في سهله الفيضى والدلتا الذين كانا أكبر مساحة من سهل النيل الحديث ودلتاه . وتظهر تلك الرواسب التى حملها نهر ما قبل النيل في كل مكان على جانبي نيل مصر ودلتاه ، وتشكل واجهاتها محاجر الرمال التى تزود مصر كلها برمال البناء .

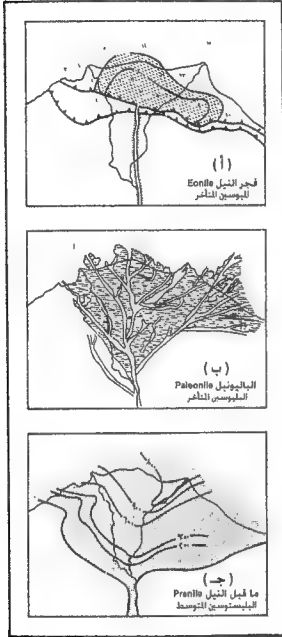
وبعد أن توقف نهر ما قبل النيل منذ حوالى 400000 سنة ، وصل إلى مصر نهر أقل قدرة أطلق عليه نهر النيل الحديث (النونيل Neonile) ، وكان اتصال هذا النهر بأفريقيا ضعيفا وتكرر انقطاعه . وفي كل مرة عاد فيها هذا الاتصال كان النهر أقل تصريفا وأقصر عمرا عن نهر ما قبل النيل . ولنهر النونيل

جدول (3.12): ملخص لأهم الأحداث التى مرت على نيل مصر منذ نشأته . العمر بملايين السنين قبل الآن .

العمر (بملايين السنين قبل الآن)	النهر	الأحداث
5.4 - 6	فجر النيل (الأيونيل) Eonile	تكون خائق النيل نتيجة جفاف البحر المتوسط وتكون دلتا على شكل مروحة في الجزء الشمال من الدلتا .
3.3 - 5.4	طور الخليج البحرى	مياه البحر المتوسط تفرق خائق فجر النيل عندما ترتفع المياه بعد عودتها لهذا البحر
1.8 - 3.3	النيل القديم (الباليونيل) Paleonile	نهر على يحتل الخليج ويملؤه برواسبه ، وتكون دلتا قدم الطائر .
0.8 - 1.8	طور الصحراء	تحول مصر إلى صحراء - توقف النيل عن الجريان .
0.4 - 0.8	ما قبل النيل (البرنيال) Prenile	أول نيل في مصر يقيم اتصالا بأفريقيا الاستوائية - نهر هادر كبير التصرف وتكون دلتا قوسية .
0.4 - حتى الآن	النيل الحديث (النونيل) Neonile	فترة يسودها نهر أقل قدرة له اتصال بأفريقيا-يعلو وينخفض لمرات عديدة . أول الأنهار ذات اتصال بأفريقيا يأتى خلال فترة مطيرة (400 ألف - 200 ألف سنة) يتلوها نهر متقلب (200 ألف - 70 ألف سنة) ثم نهران فصليان وأخيرا النهر الحديث ذو الجريان المستديم (12 ألف سنة - الآن) . تعرضت الدلتا القديمة للتعرية ثم أخذت تزاد تدريجيا خلال الثانية آلاف سنة الأخيرة .

(المصدر: سعيد، رشدى ، 1993م . نهر النيل: نشأته واستخدام مياهه في الماضى والمستقبل ، دار الهلال) .

غطاها النهر الحديث وأخذت تتزايد تدريجيا خلال السبعة إلى ثمانية آلاف سنة الماضية .



شكل (31.12): دلتاوات النيل المتعاقبة

أ. دلتا فجر النيل (الإيونيل) Eonile - الميوسين المتأخر

ب. دلتا قدم الطائر (الباليونيل) Paleonile - البليوسين المتأخر

ج. دلتا ما قبل النيل القوسية (البرينيل) Prenile - البليستوسين المتوسط .

(المصدر: سعيد ، رشدي ، 1993م . نهر النيل: نشأته واستخدام مياهه في الماضي والمستقبل. دار الهلال ، القاهرة) .

في الفترة بين ثمانية آلاف وسبعة آلاف سنة مضت ، فتكونت بذلك أرض مصر الخصبة ، والتي وصفها هيرودوت بأن مصر هبة النيل . ويوضح جدول (3.12) الأحداث التي مرت على نيل مصر منذ نشأته .

ب. تطور دلتا النيل

إن الدلتا التي نعرفها اليوم ليست إلا واحدة من دلتاوات عديدة تعاقبت على هذا الموقع . فقد كان لكل الأنهار التي سبقت النيل الحديث دلتاوات اختلفت كل واحدة منها عن الأخرى ، حيث أن الأنهار التي احتلت مجرى النيل منذ نشأته قد اختلفت عن بعضها البعض من حيث مصادر مياهها أو كمية المياه التي حملتها أو نوع الرواسب التي حملتها تلك المياه . ولذلك فقد تعاقبت على موقع الدلتا الحديثة دلتاوات مختلفة ، شكل (31.12) ، أمكن التعرف عليها ودراستها من دراسة جسات الآبار العميقة التي حفرت بدلتا النيل للبحث عن البترول .

فقد كانت دلتا فجر النيل Eonile أول الدلتاوات التي ترسبت على شكل مروحة في الجزء الشمالي من الدلتا ، ثم جاء نهر النيل القديم (الباليونيل) بعد أكثر من مليون سنة حيث أخذت الدلتا موضعها الحالي ، وبدأ النهر يتفرع عند حد الدلتا الجنوبي تقريبا . وقد تشكلت دلتا تشبه إلى حد كبير دلتا نهر الميسيسيبي الحديثة ، والتي تعرف بدلتا قدم الطائر bird-foot delta .

وقد تكونت دلتا ما قبل النيل (البرينيل) عندما حمل النهر رواسب خشنة من الرمال ، حيث كانت مياه النهر أكثف من ماء البحر التي كانت تصب فيه ، وترسبت تلك الرواسب على طول جبهة الدلتا على شكل قوس منظم دون بروز في البحر . ثم جاءت مرحلة النيل الحديث (النيليونيل) والذي تعرضت الدلتا خلاله لفترات طويلة من التحات ، فأزيلت كميات كبيرة من الدلتا القديمة وبقي جزء آخر شكل نواة للدلتا التي

الملخص

8. تتكون حولة المجارى المائية من مجموع حولة القاع

والحمولة المعلقة والحمولة الذائبة . وقد تصل نسبة حولة القاع إلى حوالى 50٪ من الحمولة الكلية . وتأتى معظم الحمولة المعلقة من تعرية حطام صخرى دقيق الحبيبات أو من جوانب المجارى المائية . وتكون الحمولة الذائبة أكبر فى المجارى المائية التى تستقبل كميات كبيرة من المياه الجوفية من المجارى المائية التى تستقبل مياهها أساسا من الجريان السطحي .

9. يقل حجم حبيبات الرواسب فى اتجاه مصب المجرى المائى نتيجة فرز وبرى الحبيبات . كما يتغير التركيب المعدنى لحمولة المجرى المائى فى اتجاه المصب حيث تضاف رواسب مخلفة التركيب .

10. عندما تنفيض المجارى المائية أثناء الفيضانات وتغمر ضفتى المجرى المائى تتكون جسورا طبيعية تتدرج جانبيا إلى غرين وصلصال مترسبين على السهل الفيضى . وتتكون الشرفات (المصاطب) من سهول فيضية مهجورة حيث يقوم المجرى المائى بالتعرية فى مستوى أكثر انخفاضاً من مستوى السهل الفيضى .

11. تنشأ المراوح الطمية (الفيضية) نتيجة الانخفاض المفاجئ فى انحدار المجرى المائى . وترتبط مساحة المروحة التكوينة بحجم المنطفة التى تمتد المروحة الطمية (الفيضية) بالرواسب أعلى المجرى المائى .

12. تتكون الدلتا عندما يدخل مجرى مائى مسطحا من الماء الساكن ويفقد قدرته على نقل الرواسب . ويعكس شكل الدلتا التوازن بين الترسيب والتعرية على امتداد الشاطئ .

1. المجارى المائية جزء من دورة الماء ، وتعتبر من الوسائل الرئيسية التى يعود بها الماء من الأرض إلى البحر . وتساعد المجارى المائية فى تشكيل سطح الأرض ونقل الرواسب إلى المحيطات .

2. يتأثر انسياب الماء فى المجارى المائية بعدد من المتغيرات أهمها التصريف والسرعة وشكل وحجم قناة المجرى المائى والانحدار ، وهو مقياس لدرجة انحدار قناة المجرى المائى لأسفل ، ومستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية) والحمولة ، وهى المواد التى يحملها أو يحركها الماء المناسب .

3. ترتبط عوامل التصريف والسرعة ومساحة القطاع العرضى لقناة المجرى المائى مع بعضها بحيث إذا تغير التصريف تغير العاملان الآخران .

4. نتيجة زيادة التصريف فى اتجاه المصب فإن عرض وعمق قناة المجرى المائى يزداد ، وتزداد السرعة بنسبة طفيفة .

5. تستطيع المجارى المائية التى تكون فيضانات كبيرة أن تنقل أحمالا كبيرة وأن تحرك الجلاميد الكبيرة .

6. مستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية) لمعظم المجارى المائية هو سطح البحر فى جميع أنحاء العالم . وقد يتسبب هذا المستوى فى وقف التعرية مؤقتا ناحية منبع المجرى المائى .

7. من النادر وجود قنوات مجارى مائية مستقيمة . وتتكون المجارى المائية المنعطفة عندما يكون الانحدار لطيفا وتتكون الحمولة من رواسب دقيقة الحبيبات . وتتكون القنوات المجدولة فى مجارى مائية تتميز بتصريف متغير بنسبة عالية وحمل كبير .

نهرى رئيسى ومصدر للمياه . وقد تم تعرف أربع
مراحل تعرف بفجر النيل والنيل القديم وماقبل
النيل والنيل . وعندما وصلت المياه بغزارة من
المرتفعات الأثيوبية وهضبة البحيرات قبل
400000 – 200000 سنة ولد النيل الحديث .

13. ترتبط أنماط صرف المجارى المائية بنوع الصخور
التواجدة أسفلها وتركيبها ، كما يمكن أن نمثنا
هذه الأنماط بالمعلومات عن تاريخ المجرى المائى .
14. نشأ نهر النيل قبل 6 ملايين سنة ، ومر
بعديد من المراحل ، حيث تميزت كل مرحلة بنظام

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

<http://barsoom.msss.com/><http://www.epa.gov/ow/><http://ps/channels/channels.html>

المصطلحات المهمة

alluvial fan	مروحة طمية (فيضية)	meander	منعطف
alluvium	طمي	mouth	مصب
antecedent stream	مجرى مناخل (سالف)	natural levee	جسر طبيعي
base level	مستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية)	oxbow lake	بحيرة قوسية (بحيرة قرن الثور)
bed load	حولة القاع	placer	ركيزة (مرقد أو رواسب حصوية مكانية)
bird-foot delta	دلتا قدم الطائر	point bar	حاجز حرق (جانبى)
bottomset bed	طبقة القاع	pothole	حفرة وعالية
braided stream	مجرى مجدول (مضفر)	radial drainage	تصريف شعاعي
capacity	قدرة	rapids	جنادل
competence	كفاءة	rectangular drainage	تصريف متعامد
consequent stream	مجرى انحداري	recurrence interval	فترة تكرار
cutoff	قطع نهرى	reservoir	خزان
delta	دلتا	river	نهر
dendritic drainage	صرف شعيرى	runoff	جريان سطحي
discharge	تصريف	saltation	وثب
dissolved load	حولة ذائبة	stream	مجرى مائي
distributary	فرع توزيع	stream piracy	فرصة نهريّة
drainage basin	حوض صرف	subsequent stream	مجرى نالي (لاحق)
drainage network	شبكة صرف	superposed stream	مجرى مائي مترابك
flood	فيضان	suspended load	حولة معلقة
floodplain	سهل فيضي	terrace	شرفة (ج. شرفات) أو مصطبة نهريّة
foreset bed	طبقة الواجهة	transpiration	عملية التبخر
gradient (stream)	انحدار (المجرى المائي)	tributary	رافد
groundwater	مياه جوفية	topset bed	طبقة القمة
hydrologic cycle	دورة الماء	trellis drainage	صرف تشابكى (عريشى)
hydrology	علم المياه (الهيدرولوجيا)	turbulent flow	انسياب مضطرب
infiltration	تسرب	underground water (groundwater)	ماء جوفى
laminar flow	انسياب رقائقى (صفائحى)	valley	وادي
load	حولة	water divide	مقسم المياه
longitudinal profile	قطاع طولى (جانبية طولية)	waterfalls	مساقط المياه (شلالات)

الأسئلة

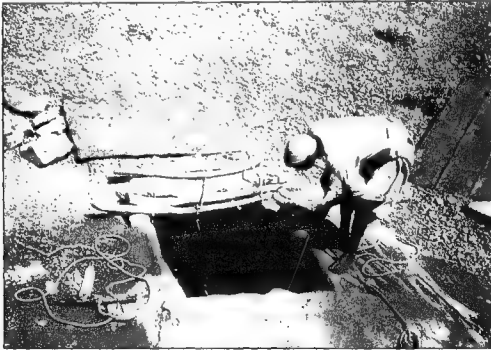
- 1- ما الدليل الذى يقودنا للتفكير فى أن المجارى 11- اذكر تعريف القطاع الطولى للمجرى المائى .
- المائية يجب أن تكون قوة كبيرة تؤثر فى تغيير شكل 12- إذا كانت مدينتك مقامة على سهل فيضى غمر فى سطح الأرض ؟
- 2- وضح كيف تتعدل أبعاد المجرى المائى عمقا وعرضا وسرعة الاستجابة للتغير فى التصريف .
- 3- اذكر العوامل التى تؤدى إلى تغيير نظام المجارى المائية المجدولة إلى نظام المجارى المائية المنعطفة .
- 4- ما العوامل التى يجب أن تتغير فى المجرى المائية لكى يحمل الحمى الدقيق كحمولة معلقة بعد أن كان يتحرك كحمولة قاع ؟
- 5- لماذا يقل حجم حبيبات الرواسب المنقولة فى اتجاه المجرى المائى إذا زادت السرعة فى اتجاه المجرى المائى ناحية المصب ؟
- 6- كيف يمكن استخدام التسابع الطباقى الداخلى والصفات الرسوبية للتمييز بين دلتا ومروحة طمية محفوظة فى سجل طبقي ؟
- 7- كيف يمكن أن نحدد السرعة ما إذا كان الانسياب صفائحيا أو مضطربا ؟
- 8- كيف تختلف قناتا الأنهار المنعطفة عن المجدولة ؟
- 9- ما الجسر الطبيعى ؟ وكيف يتكون ؟
- 10- ما هو تصريف المجرى المائى ؟ وكيف يتغير مع السرعة ؟
- 11- اذكر تعريف القطاع الطولى للمجرى المائى .
- 12- إذا كانت مدينتك مقامة على سهل فيضى غمر فى العام الماضى بفيضان - 50 سنة، ما إمكانية أن يتكرر فيضان الارتفاع بنفسه فى العام التالى ؟ اذكر ماذا يعنى مصطلح فيضان - 50 سنة .
- 13- إذا كنت تعيش فى مدينة على ضفاف منعطف لنهر كبير ، واقترح مهندس المدينة أن تبنى جسور صناعية جديدة وعالية لمنع المنعطف من القطع النهري . اذكر الأدلة التى تتفق مع هذا الاقتراح أو تعارضه .
- 14- قام المهندسون بحفر مجرى مائى منعطف ، فإذا ترك هذا المجرى لكى يعدل مجراه طبيعيا ، ما التغيرات التى يمكن أن تتوقعها ؟
- 15- إذا افترض أن هناك ارتفاعا ملحوظا فى مستوى سطح البحر نتيجة انصهار الجليد القطبى ، اذكر كيف يتأثر القطاع الطولى للأنهار فى العالم .
- 16- لم تتكون دلتا عند دخول نهر كبير به حمولة رسوبية كبيرة إلى البحر أو المحيط ؟ اذكر العوامل والظروف التى قد تكون مسئولة عن عدم تكون الدلتا .
- 17- قام مجرى مائى بتعرية قناته فى اتجاه مصبه بصورة كبيرة ، خلال السنوات الأولى التالية لبناء سد عليه . هل كان من الممكن توقع هذه التعرية ؟

- I. المياه الموجودة تحت سطح الأرض
 - أ. منسوب الماء الجوفي
 - II. كيف يتحرك الماء في التربة والصخور?
 - أ. حركة الماء في نطاق التهرية
 - ب. حركة الماء في نطاق التشبع
 - ج. سرعة انسياب المياه الجوفية
 - III. تصنيف الطبقات الجيولوجية حسب قدرتها على حمل المياه الجوفية
 - أ. أماكن المياه الجوفية
 - ب. بعض خصائص أماكن المياه الجوفية
 - ج. الانسياب الارتوازي
 - IV. العلاقة بين أماكن المياه الجوفية والمياه السطحية
 - أ. التوازن بين إعادة الملء والتصريف
 - ب. التصريف الطبيعي (الينابيع) والصناعي (الآبار)
 1. الينابيع
 2. الآبار
 - V. نوعيه (درجة جودة) الماء وتلوث المياه الجوفية
 - أ. كيميائية المياه الجوفية
 - ب. التلوث بمخلفات المجارى
 - ج. النفايات السامة والسموم الزراعية
 - د. تخزين النفايات الخطرة تحت الأرض
 - VI. العمل الجيولوجي للمياه الجوفية
 - أ. الذوبان

- ب. التلاحم والإحلال الكيميائي
- ج. الكهوف والمغارات الكربونانية
- د. رواسب الكهوف
- هـ. الحفر البالوعية
- و. طبوغرافية الكارست
- VII. الماء الموجود في أعماق القشرة الأرضية
- أ. المياه الحرمانية

النفائات البشرية والصناعية ، والتي يصل جزء كبير منها إلى المياه التي يعتمد عليها الناس في حياتهم، مما أدى إلى ظهور عديد من المشكلات الكبيرة في هذه التجمعات السكانية ، مثل مدى كفاية هذه المياه للاحتياجات المستقبلية؟ وهل نوعية هذه المياه مناسبة للأغراض المختلفة التي تستخدم فيها ، ومدى نقاء هذه المياه؟ ، حيث أن الماء الصالح للاستخدام يجب أن يكون ذا صفات جيدة ، وأن يكون عديم اللون والطعم والرائحة .

يعتبر الماء ضرورة حيوية للإنسان ، أيا كان مصدر الحصول عليه سواءً من الأنهار أو المجارى المائية عموماً أو من البحيرات أو من ماء المطر مباشرة أو من المياه الجوفية . وقد أنشئت معظم المدن والتجمعات السكانية بالقرب من المجارى المائية التي تمدّها بمصدر الماء . ونتيجة لتزايد عدد السكان بهذه المدن والتجمعات السكانية عموماً فإن هذه المجارى المائية أصبحت غير كافية ، ولذلك لجأ الإنسان للحصول على الماء من مصادر تقع على مسافات بعيدة عبر قنوات ، أو بحفر آبار للحصول على المياه الجوفية (شكل 1.13) .



شكل (1.13): بئر أبو الحاميد في وادي أبو الحاميد - الصحراء الشرقية - مصر . (د. حسين أحمد على ، هيئة المساحة الجيولوجية - مصر) .

أ. المياه الموجودة تحت سطح الأرض
المياه الجوفية مصدر مهم للماء ، وخاصة في المناطق القاحلة . وقد حفر الإنسان في أزمنة ما قبل الميلاد قنوات وأنفاق يصل طولها إلى عدة كيلو مترات لجمع

ونتيجة للتزايد السكاني فقد تزايد الطلب على المياه ، مما أدى إلى تناقص الماء في عديد من الأماكن ، كما أدى النمو الصناعي المطرد إلى تكون كميات كبيرة من

وقد قام العالم الفرنسي بيير بيررو Pierre Perrault بمحاولة تقدير كمية المياه الجوفية المستمدة من الأمطار، بقياس كمية الأمطار السنوية المتساقطة على جزء من حوض نهر السين في شرق فرنسا، وأيضا قياس متوسط التصريف السنوي للمجرى المائي في الجزء نفسه من حوض التصريف. وتوصل بيررو بعد حساب الفقد نتيجة البحر، أن الفرق بين كميات المطر المتساقط والماء المنصرف خلال عدة سنوات يكفى ليكون كمية الماء الموجودة في باطن الأرض في المنطقة.

ويتواجد الماء في كل مكان تحت سطح الأرض. إلا أن أكثر من نصف الحجم الكلى للمياه الجوفية بها فيه الذى يستخدمه الإنسان يتواجد على عمق يصل إلى حوالى 750 مترا تقريبا من سطح الأرض. ويقدر أن حجم الماء في هذا النطاق يكافئ طبقة من الماء يبلغ سمكها 55 مترا وتغطي سطح الكرة الأرضية بالكامل. وتقل كمية المياه الجوفية تدريجيا تحت عمق 750 مترا، ويكون التغير غير منتظم. وقد عُثر على الماء على عمق 9.4 كم أثناء حفر آبار البترول. كما عثر العلماء الروس على الماء على عمق يزيد عن 11 كم أثناء حفر بئر عميقة في جزيرة كولا. وعلى الرغم من أن الماء قد يتواجد في صخور القشرة الأرضية عند هذه الأعماق، إلا أن الضغوط التى تسببها الصخور التى تعلوه تكون عالية وتكون المسام الموجودة صغيرة جدا لدرجة أنه من المستبعد تواجد كمية كبيرة من الماء فيها، أو أن الماء يتحرك بسهولة عند تلك الأعماق. أما بالنسبة لدراستنا الحالية، فإن المياه الجوفية هى تلك المياه التى توجد في المسافة الواقعة بين سطح الأرض حتى عمق حوالى 750 مترا.

أ. منسوب الماء الجوفى

يتحرك الماء المنسرب إلى القشرة الأرضية تحت تأثير الجاذبية الأرضية في نطاقين من التربة والصخور يطلق

ونقل المياه الجوفية في عديد من بلدان شمال أفريقيا وشرق آسيا. ولم يكن معروفا حتى قرب نهاية القرن السابع عشر أن مياه الأنهار تنشأ أصلا من مياه الأمطار، رغم أن القرآن الكريم أشار إلى هذا في عديد من السور القرآنية قبل أربعة عشر قرنا. كما ثبت أن جزءا يسيرا فقط من الماء المتساقط على أحواض التجميع والروافد ينساب على هيئة أنهار. ولم يكن من الصعب تخيل مصير باقى الماء المتساقط، حيث يتبخر بعض هذا الماء، بينما تستخدم النباتات الجزء الباقى، حيث يرشح ويتسرب إلى باطن الأرض. وهذا الجزء الأخير هو المصدر الأساسى للمياه الجوفية.

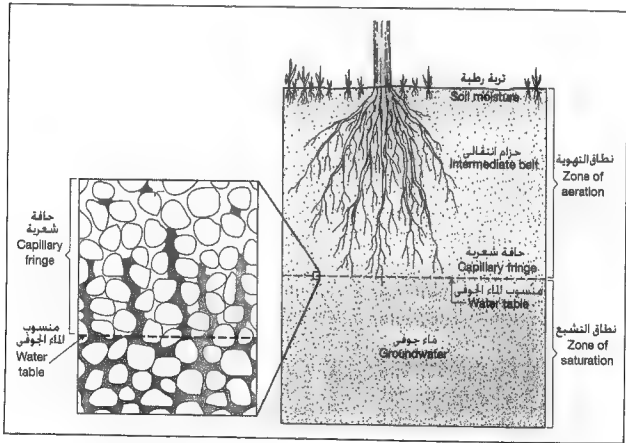
ومن المعروف أن أقل من 1٪ من الماء على الأرض هو مياه جوفية. وتعرّف المياه الجوفية groundwater بأنها كل الماء الموجود في فراغات صخور الأساس bedrock والحطام الصخرى (الأديم) regolith. وعلى الرغم من أن حجم الماء الجوفى يبدو صغيرا، إلا أنه يزيد 40 مرة عن حجم كل الماء العذب الموجود في البحيرات أو المنساب في المجارى المائية، كما يساوى حوالى ثلث الماء الموجود في كل المثلث والجليد القطبى في العالم.

وتنشأ معظم المياه الجوفية - كما ذكرنا سابقا - من الأمطار التى تسرب إلى الأرض لتصبح جزءا من نظام المياه الجوفية. ويتحرك الماء السطحي ببطء ناحية المحيط، إما مباشرة خلال الأرض أو نتيجة الانسياب فوق سطح الأرض لينضم إلى المجارى المائية (شكل 1.12)، التى تنساب بدورها إلى المحيط. وتنشأ المياه السطحية أساسا كماء جوى meteoric water، وهو الماء المتساقط من الغلاف الجوى الحالى. وقد اشتقت كلمة جوى meteoric من الكلمة الإغريقية meteoron بمعنى ظاهرة في السماء، ويستمد منها أيضا كلمة meteorology أى علم الأرصاد الجوية.

منسوب المياه الجوفية مباشرة نطاق ضيق لا يزيد سمكه على 60 سم ، ويكون هذا النطاق رطباً نتيجة التجاذب الشعري *capillary attraction* الذى يجذب الماء من قمة منسوب المياه الجوفية إلى مسافة قصيرة داخل نطاق التهوية . ويسمى هذا النطاق الحافة الشعيرية *capillary fringe* (شكل 2.13) . والتجاذب الشعري هو قوة التماسك بين سائل وصلب ، والتي تسبب سحب الماء لأعلى في أنابيب صغيرة . وهى القوة نفسها التي تسحب الحبر لورق النشاف أو الكيروسين لفتيلة الكيروسين .

وعلى الرغم من أن منسوب المياه الجوفية يوجد تحت سطح الأرض ولا يمكن رؤيته ، إلا أنه دُرس وعُملت له خرائط ، من خلال الدراسات التي أجريت

على العلوى منها نطاق التهوية *zone of aeration* وعلى السفلى منهما نطاق التشبع *zone of saturation* ، ويفصل بينهما ما يعرف بمنسوب الماء الجوفى أو الأرضى *water table* . ويتميز نطاق التهوية بأن فراغات المسامية فيه تكون مشبعة جزئياً بالماء ، الذى يكون طبقة رقيقة جداً تلتصق بالحبيبات نتيجة للتوتر السطحي ، كما يمتلئ جزئياً بالهواء أيضاً . ويسمى هذا النطاق أيضاً بنطاق الارتشاح *vadose zone* . أما نطاق التشبع فيتميز بأن كل فتحات الصخر تكون ممتلئة بالماء (شكل 2.13) . أما منسوب الماء الأرضى فيطلق على الحد الفاصل بين نطاقى التهوية والتشبع . وفى الرسوبيات دقيقة الحبيبات ، يوجد فوق



شكل (2.13): توزيع الماء الجوفى (الأرضى) *underground water* ، حيث يفصل منسوب الماء الجوفى نطاق التهوية عن نطاق التشبع (After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

الأرض ، ويرجع السبب في ذلك إلى أن الماء يميل للتحرك نحو المناطق المنخفضة تضاريسيا حيث يكون الضغط عليه أقل ما يكون . وفي أوقات الجفاف ، حيث يتوقف سقوط الأمطار لعدة أسابيع أو حتى أشهر فإننا نشعر أن منسوب المياه الجوفية قد انخفض في الآبار الجافة ، ويؤدي تكرار تساقط المطر إلى تزويد الأرض بالماء حتى يظل مستوى المياه الجوفية عند المستوى العادي .

وأيما كان العمق ، فإن منسوب الماء الجوفي يعتبر سطحا مهما ، لأنه يمثل الحد العلوي لكل الماء الجوفي . ولهذا السبب فإن تحديد عمق وشكل هذا المنسوب يمثل هدفا رئيسيا للجيوولوجيين والقائمين على حفر آبار المياه .

على الآبار والينابيع وانسياب الماء على سطح الأرض . كما درس تحرك المياه الجوفية باستخدام الصبغات ، حيث جُمع كم هائل من المعلومات عن هذا الجسم غير المرئي من المياه الجوفية .

وعندما يجفر بئر تحت منسوب المياه الجوفية ، فإن الماء ينساب من نطاق التشبع في الخفرة ويملؤها حتى مستوى هذا المنسوب . وقد يتواجد منسوب المياه الجوفية (الحد العلوي لنطاق التشبع) على عمق متر أو أكثر في المناطق الرطبة ، أو على عمق مئات الأمتار أسفل سطح الأرض في المناطق الصحراوية . ويوجد منسوب المياه الجوفية في البحيرات والمستنقعات عند سطح الأرض . ومن الطبيعي أن يتحدد منسوب الماء الجوفي ناحية أقرب مجرى مائي أو بحيرة ، بينما يكون في



شكل (3.13): شكل توضيحي لبيان العلاقة بين منسوب الماء الجوفي وسطح الأرض واختلاف منسوبه خلال نطاق التشبع المتغير بعد فترات طويلة من سقوط المطر أو الجفاف (الجذب) . يلاحظ أن الماء يتحرك إلى الجهات المنخفضة تضاريسيا ، حيث يكون الضغط أقل ما يكون ، كما ينخفض مستوى الماء الجوفي في الفصول الجافة ويرتفع في الفترات الرطبة .

(After Holmes, D.L., 1984: Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson, Great Britain).

II. كيف يتحرك الماء في التربة والصخور؟

تتحرك المياه الجوفية باستمرار كجزء من دورة الماء في الطبيعة . ويتسرب ماء المطر ، والذي نتج أساسا من بخر الماء في المحيطات ، ليدخل إلى خزان المياه الجوفية . ويصل بعض هذا الماء المتحرك ببطء إلى قنوات المجارى المائية ليساهم مع الماء المتحرك إلى المحيط حيث تبدأ الدورة مرة أخرى .

المناطق الصحراوية بعيدا عن سطح الأرض . وحيث إن المياه الجوفية تتواجد في كل مكان على عمق ما تحت سطح الأرض ، فإنه سيكون هناك منسوب للمياه الجوفية باستمرار .

وفي المناطق الرطبة ، يكون منسوب المياه الجوفية مطابقا تقريبا لشكل سطح الأرض الذي يعلوه (شكل 3.13) ، حيث يكون مسطحا في المناطق الأفقية ، بينما يرتفع وينخفض في مناطق التلال مع تغير شكل سطح

ب. حركة الماء في نطاق التشيع

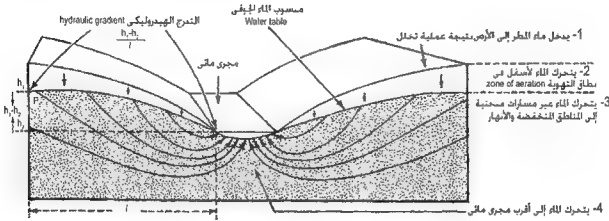
يُطلق على حركة الماء الجوفي في نطاق التشيع مصطلح **percolation** ، وهى عملية تشبه انسياب الماء من الإسفنج عند عصره بلطف . ويتخلل الماء ببطء في مسام صغيرة جدا ويتحرك عبر مجارى مائية دقيقة . وتكون تلك الحركة أسهل عبر الأجزاء المركزية من الفراغات ، ولكن تقل إلى الصفر عند جوانب كل فراغ بسبب قوى الالتصاق الجزيئى **molecular attraction**.

ويتحرك الماء تحت تأثير الجاذبية الأرضية من المناطق التى يكون فيها منسوب المياه الجوفية عاليا إلى المناطق التى يكون منسوب الماء فيها منخفضا . ومعنى ذلك أن الماء يتحرك عموما في اتجاه المجارى المائية أو البحيرات على سطح الأرض (شكل 3.13) و(4.13). ويتحرك بعض الماء فقط أسفل منسوب المياه الجوفية مباشرة متبعا أقصر الطرق، بينما ينساب معظم الماء في مسارات طويلة ومنحنية تمتد بعيدا في باطن الأرض . كما قد تتجه بعض المسارات العميقة إلى أعلى ضد الجاذبية الأرضية ، حيث تدخل المياه الجوفية إلى بحيرة أو مجرى مائى ، ويحدث هذا الانسياب لأعلى عندما يكون الماء واقعا تحت تل أو مرتفع ويكون على أى مستوى في نطاق التشيع ، لأنه يكون حيثنذ واقعا تحت ضغط أعلى من الضغط الموجود أسفل المجرى المائى . ولذلك يميل الماء لأن ينساب ناحية النقاط التى يكون الضغط فيها أقل ما يمكن . ومع ذلك ، تتحرك معظم المياه الجوفية التى تدخل إلى المجرى المائى على امتداد مسارات ضحلة ليست بعيدة عن منسوب المياه الجوفية .

وتتحرك معظم المياه الجوفية ببطء في مئات الأمتار القليلة القريبة من سطح الأرض، لدرجة أن سرعتها تقاس بالستيمترات في اليوم أو بالأمتار في العام ، على عكس الانسياب السريع للأهبار والذى يقاس بالكيلومترات في الساعة . والسبب في هذا التناقض بسيط ، حيث ينساب الماء في المجرى المائى دون عوائق في قنوات مفتوحة ، أما المياه الجوفية فإنها تتحرك غالبا عبر مسارات طويلة دقيقة ومتعرجة . لذلك ، فإن انسياب المياه الجوفية يعتمد بدرجة كبيرة على طبيعة الصخر أو الراسب الذى ينساب خلاله .

أ. حركة الماء في نطاق التهوية

يتسرب ماء المطر المتساقط في التربة التى تحتوى عادة على صلصال ناتج من عملية التجوية الكيميائية إلى صخر الأساس . ونتيجة وجود حبيبات الصلصال الدقيقة ، فإن التربة تكون عموما أقل نفاذية من الحطام الصخري (الأديم) **regolith** الموجود أسفلها والذى يحتوى على حبيبات أكبر حجما . وتعمل النفاذية المنخفضة وحبيبات الصلصال الدقيقة على أن تحتفظ التربة بجزء من الماء بسبب تأثير قوى الجاذبية الجزيئية . وتسمى هذه الطبقة بطبقة التربة الرطبة **layer of soil moisture** (شكل 2.13) . ويتبخر جزء من هذه الرطوبة مباشرة إلى الهواء ، كما تمتص جذور النباتات الكثير منها ، ثم تعود بعد ذلك إلى الغلاف الجوى أثناء عملية التتح . ويتسرب الماء الذى لم يتأثر بقوى الجاذبية الجزيئية إلى أسفل في التربة حتى يصل إلى منسوب المياه الجوفية تحت تأثير قوة الجاذبية الأرضية . ومع توالى سقوط الأمطار يتسرب المزيد من الماء في الأرض ، بينما يكون نطاق التهوية عموما أقرب إلى الجفاف بين فترات سقوط المطر باستثناء الحافة الشعرية وطبقة التربة الرطبة .



شكل (4.13): حركة الماء الجوفي في مادة متفلة ، حيث تمثل الأسهم الطويلة المتحنية قليلاً من كثير من مسارات شبه متوازنة محتملة للماء الجوفي خلال المادة المتفلة . ويتحدد التدرج الهيدروليكي hydraulic gradient عند أى نقطة مثل p من الفرق في الارتفاع بين النقطتين (h_1) و (h_2) مقسوماً على المسافة بين النقطتين .
(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

permeability ، وهو يقيس ببساطة السهولة التي

يتحرك بها الماء خلال الصخر . ويمكن توضيح المعادلة التي اقترحها دارسى كالتالي

$$V = \frac{K(h_1 - h_2)}{\ell} \quad (2)$$

وكما أوضحنا في الفصل الثاني عشر ، فإن تصريف المجارى المائية (Q) يتغير كدالة في كل من سرعة المجرى المائي (V) ومساحة المقطع العرضي (A). ويعتمد أيضاً تصريف الماء الجوفي خلال الصخر على سرعة الانسياب وعلى مساحة المقطع العرضي لمجرى الانسياب. وحيث إن مساحة المقطع العرضي في هذه الحالة لا تكون مساحة قناة واحدة مفتوحة ، وإنما تعبر عن مساحة نظام متصل من المسام ، فإنه يمكن التعبير عن معدل التصريف باستخدام المعادلة $Q = AV$. فإذا استبدلنا قيمة V في هذه المعادلة بقيمة V في المعادلة رقم (2) ، وهى تشير إلى سرعة الماء في المجرى المائي فإننا نصل لمعادلة جديدة هى :

$$Q = \frac{AK(h_1 - h_2)}{\ell}$$

ج. سرعة انسياب المياه الجوفية

يوضح شكل (4.13) انحدار سطح المياه الجوفية عن طريق قياس الفرق في الارتفاع بين نقطتين h_1 و h_2 تقعان على هذا السطح وقسمة الناتج على المسافة الأفقية (ℓ) بين النقطتين. ويطلق على قيمة الانحدار الناتج عموماً التدرج الهيدروليكي hydraulic gradient. وهكذا تتناسب سرعة الماء الأرضي (V) مع التدرج الهيدروليكي :

$$V \propto \frac{h_1 - h_2}{\ell} \quad (1)$$

وفي منتصف القرن التاسع عشر توصل المهندس الفرنسى هنرى دارسى Henri Darcy إلى أن سرعة الماء الأرضي لا ترجع إلى انحدار منسوب الماء الجوفي (الانحدار الهيدروليكي) فقط ولكن إلى نفاذية الصخر الذى ينساب الماء خلاله أيضاً . وقد اقترح دارسى معادلة يربط بها بين النفاذية وعجلة الجاذبية الأرضية ولزوجة الماء المشار إليه بمعامل (K). ويسمى هذا المعامل بمعامل النفاذية coefficient of

جـ. طبقات صماء aquifuges وهي تكون ليس لها قدرة على تخزين أى كمية من الماء ، حيث لا يوجد بها أى نوع من الفراغات (منعدمة المسامية) ، وبالتالي فليس لها أى قدرة على إمرار الماء عبر فراغاتها (منعدمة النفاذية) . ومن أمثلة هذه التكوينات الصخور النارية غير المشققة وغير المجوأة

وسيكون اهتمامنا منصبا هنا على النوع الأول والذي يشمل مكان المياه الجوفية التي تتواجد بكثرة في مصر، مثل الخزانات الموجودة على امتداد وادي النيل والدلتا وخزان الحجر الرملى النوبى تحت الصحراء الغربية والصحراء الشرقية وسيناء ، وكذلك خزانات الحجر الجيرى المشقق والصخور النارية والمتحولة المشققة أيضا ولكن يلاحظ أن النوعين الأخيرين يكونان محدودى الانتشار والأهمية .

أ. مكان المياه الجوفية

يطلق على أماكن تواجد المياه الجوفية مصطلح مكمن ماء جوفى **aquifer** (من اللاتينية aqua بمعنى ماء و fer بمعنى يحمل) . ويعرف مكمن الماء الجوفى بأنه جسم مكون من الصخور أو الحطام الصخرى (الآديم) على النفاذية يقع فى نطاق التشبع ويخزن المياه الجوفية ويسمح بمرائها بكميات تكفى لإمداد الآبار بالماء . و تعتبر طبقات الجروال والرمل والحجر الرملى المنفذ مكان مياه جوفية جيدة عموما ، لأنها عادة ما تكون عالية النفاذية وتمتد على مساحات كبيرة . ومع ذلك فإن وجود المادة اللاصقة بين حبيبات الحجر الرملى يقلل قطر المسام وتقل بالتالى النفاذية.

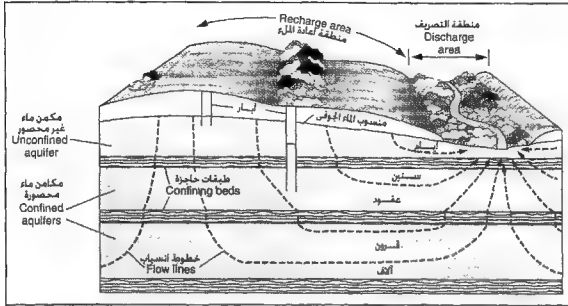
ويسمى مكمن الماء الجوفى مكمن ماء غير محصور **unconfined aquifer** عندما ينطبق سطحه العلوى مع منسوب المياه الجوفية نظرا لأنه ممتلئ جزئيا بالماء ، بحيث يلامس بذلك الغلاف الجوى (شكل 5.13) .

وهى صورة أخرى لقانون دراسى **Darcy's law** . فإذا أخذنا مساحة المقطع العرضى (A) كثابت ، فإنه عند قياس أى متغيرين من المتغيرات الثلاثة المتبقية [التصريف (Q) ومعامل النفاذية (K)، والانحدار الهيدرولى $L / (h_1 - h_2)$] فإنه يمكننا حساب قيمة المتغير الثالث .

III. تصنيف الطبقات الجيولوجية حسب قدرتها على حمل المياه الجوفية
لا تشكل جميع التكوينات الجيولوجية خزانات مياه جوفية (مكامن) ، وذلك يرجع إلى اختلاف هذه التكوينات فى خواصها الصخرية والتركيبية . وبالتالى ، يمكن تقسيم التكوينات المختلفة حسب قدرتها على حمل المياه الجوفية إلى الأقسام التالية:

أ. مكان للمياه الجوفية **aquifers** وهى طبقات حاملة للمياه الجوفية تتميز بصفتين أساسيتين وهما:
1. القدرة على تخزين المياه فى الفراغات الموجودة فى الصخور (أى تتميز بمساميتها porosity العالية).
2. القدرة على إمرار المياه عبر الفراغات الموجودة فى الصخور بكميات كبيرة (أى تتميز بنفاذية permeability عالية). ومن أمثلة هذه المكامن الصخور الرملية والرواسب الرملية والوديانية والصخور الجيرية المشققة ، وكذلك الصخور النارية والمتحولة المشققة والمجوأة .

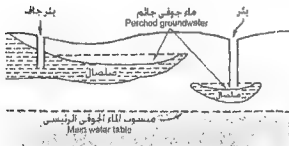
ب. طبقات حابسة للماء أو كتيمية **aquicludes** وهى تكوينات جيولوجية تتميز بصفتين هما: 1. القدرة على تخزين المياه فى الفراغات الموجودة فى الصخور (أى تتميز بمساميتها العالية). 2. ليس لها قدرة على إمرار المياه عبر الفراغات من مكان إلى آخر بكميات كبيرة (أى تتميز بنفاذية منخفضة) ، ومن أمثلة هذه التكوينات الصخور الطينية .



شكل (5.13): يتكثف مكامن الماء غير المحصور على سطح الأرض، ويمتلئ جزئياً بالماء، ويرتفع الماء في البئر الضحل إلى مستوى منسوب الماء الجوفي. وينفصل مكامن الماء المحصور عن سطح الأرض بطبقة حاجزة، ويكون تمثلها كلية بالماء وتحت ضغط، ويرتفع الماء في الآبار فوق المكامن. وتوضح خطوط الانسياب اتجاه انسياب الماء الجوفي. وتشير الأيام والسنين والمقود والقرون وآلاف السنين إلى الوقت المطلوب للماء الجوفي كي يدخل في مكامن الماء في مناطق إعادة التزويد، ثم ينساب إلى مناطق التصريف.

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlson, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition, McGraw Hill, Boston).

لثلاث الكيلومترات المربعة. وقد يكون الماء الجاثم عبارة عن جزء من منزل من الطبقة الحاملة للمياه الجوفية تفصله عن بقية الطبقة صخور قليلة النفاذية أو غير منفذة (حاجس للماء). ويضغ الماء من آبار الماء الجاثم ولكن بكميات محدودة عادة.



شكل (6.13): طبقة من الصلصال حاجبة للماء موجودة في نطاق التهوية فوق منسوب الماء الجوفي، وتحتجز الماء في مستوى أعلى من منسوب الماء الجوفي، ويسمى هذا الماء المحتجز بماء جوفي جاثم (perched groundwater).

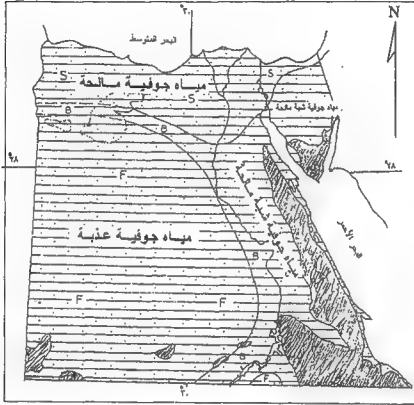
(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition, John Wiley and Sons, Inc., New York).

وعندما يجد حابس ماء (طبقة غير منفذة) مكامن مياه جوفية تمثلها بالماء من أعلى ومن أسفل، فإن مكامن المياه الجوفية يسمى مكامن ماء محصور **confined aquifer**، ويكون انسياب الماء في هذا المكامن تحت ضغوط عالية. ويرتفع وينخفض منسوب المياه الجوفية في مكامن الماء غير المحصور خلال الفصول الممطرة والجافة، بينما لا يستجيب مكامن الماء المحصور لأي تغيرات فصلية.

وإذا وجد حابس للماء مثل طبقة من الصلصال قليلة النفاذية في نطاق التهوية فوق منسوب المياه الجوفية الرئيسي، فإن الماء المتخلل لأسفل يصطاد جزء منه ويحبس ليكون نطاق تشبع محلياً يسمى ماء جوفياً جاثماً **perched groundwater** يحده منسوب ماء جاثم (معزول) **perched water table** (شكل 6.13). وتكون المياه الجاثمة عدسات صغيرة يطلق عليها عدسة مائية معلقة. ولكن قد يمتد الماء الجاثم

وفي مصر، يعتبر مكنن الحجر الرملى النوبى Nubian Sandstone Aquifer مثالا للمكانم الإقليمية، حيث يشغل مساحات واسعة في مصر سواء فوق سطح الأرض أو تحت السطح (شكل

تسبب حصرا محليا في متكون الحجر الرملى النوبى. أما الحصر الإقليمى فتسببه طبقات طفلية سميكة تعرف بطفل الداخلة Dakhla Shale أو طبقات الطفل متعدد الألوان Variegated Shale.



شكل (7.13): توزيع متكونات الحجر الرملى النوبى في مصر التى تكون نظم المياه الجوفية الخاصة بها. F = ماء جوفى عذب، B = ماء جوفى شبه مالح، S = ماء جوفى مالح.

(المصدر: حفنى، كمال وشطرا، عبده 2004م: المياه الجوفية في مصر، وزارة الموارد المائية والرى، جمهورية مصر العربية).

7.13). وهو جزء من نظام إقليمي يمتد عبر الحدود

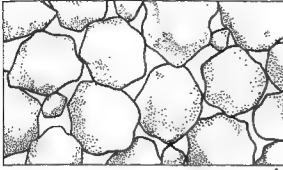
الجغرافية لكل من ليبيا والسودان غربا، وفي كل من فلسطين والأراضي المحتلة والأردن والسعودية شرقا.

ويتراوح سمك متكون الحجر الرملى النوبى بين أقل من 500 متر وأكثر من 3000 متر من الحجر الرملى، والذى يتخلله في مواقع كثيرة طبقات طفلية يتجاوز سمكها مائة متر. وهو يتواجد غالبا في شكل عدسات

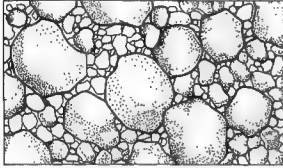
ب. بعض خصائص مكانم المياه الجوفية

تتألف المياه الجوفية الفراغات الموجودة في الصخور، كما تستطيع هذه المياه المرور في الصخور من جزء لآخر، وتعرف هاتان الخاصيتان بالخاصية والنفاذية على الترتيب. ونعرض فيما يلى وصفا لهاتين الخاصيتين:

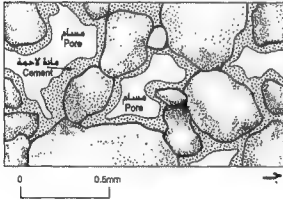
1. المسامية



أ



ب



ج

شكل (8.13): المسامية porosity في الرواسب المختلفة .

أ. راسب جيد الفرز تصل المسامية فيه إلى 30٪

ب. راسب رديء الفرز تكون المسامية فيه 15٪ ، حيث تملأ

الحبيبات الدقيقة الفراغات بين الحبيبات الكبيرة

جـ. تنخفض المسامية أيضا في راسب على المسامية نتيجة ملء

المادة اللاصقة للمسام بين الحبيبات .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

دورا كبيرا في تحديد نفاذية الصخر. والالتصاق الجزيئي

هو قوة توجد بين سطح الجسم الصلب وغلالة رقيقة

من الماء ، حيث تسبب هذه القوة في التصاق هذه

الغلالة بسطح الصخر ، على الرغم من قوة الجاذبية

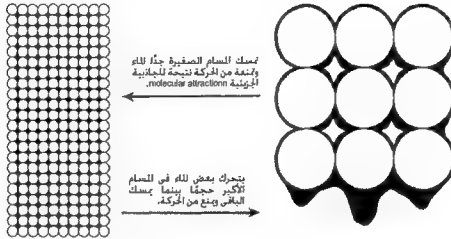
تعرف المسامية porosity بأنها خاصية وجود فراغات أو مسام بين حبيبات الصخور أو الرواسب . وتقدر المسامية بنسبة الحجم الكلي للفراغات إلى حجم الصخر نفسه مضروباً في مائة (أي النسبة المئوية) . وهذه المسامية هي التي تحدد كمية الماء التي يمكن أن يخزنها حجم معين من الرواسب أو الصخور. وتؤثر أحجام وأشكال حبيبات الصخر ، بالإضافة إلى طريقة كبس (دمج) الحبيبات compactness ، وطريقة ترتيبها في المسامية (شكل 8.13 أ ، ب) . وقد تصل المسامية في بعض الرمال أو الجروول جيد الفرز إلى نسبة 20 ٪ ، بينما تصل المسامية في بعض الصلصال clay المسامي إلى نسبة 50 ٪ ، رغم أن حجم أي من مسام الصلصال يكون دقيقاً جداً عنه في الرمل والجروول .

وتتأثر المسامية في الصخر الرسوبي ليس فقط بالفرز sorting وتعبئة (ترتيب) الحبيبات ، ولكن بالدرجة التي تملأ بها المسام بالمادة اللاصقة أيضاً (شكل 8.13 جـ) . وعلى الجانب الآخر تكون مسامية الصخور النارية والمتحولة منخفضة وتنتج عن وجود بعض الفواصل والكسور بها .

2. النفاذية

تعرف النفاذية permeability (من اللاتينية permeare بمعنى يخترق أو ينفذ إلى) بأنها قابلية الصخر لإمرار سائل خلال مسامه . ولا تعنى المسامية العالية بالضرورة وجود نفاذية عالية ، لأن حجم ومدى اتصال المسام ببعضها يؤثران على النفاذية بطريقة هامة.

وتلعب العلاقة بين حجم المسام والالتصاق الجزيئي molecular attraction لأسطح الصخر



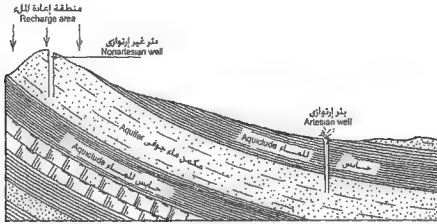
شكل (9.13): تأثير الجاذبية الجزيئية molecular attraction في مسام مختلفة الأنماط .

(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

جد. الانسياب الارتوازي

تنتقل المياه الجوفية في مكامن الماء غير المحصور خلال الطبقات المنفذة التي تمتد إلى سطح الأرض في مناطق إعادة الملء والتصريف . ويكون مستوى الخزان في مكامن الماء غير المحصور هو ارتفاع مستوى الماء الجوفي نفسه ، أما في مكامن الماء المحصور ، فإن الماء لا يمكن أن ينساب خلال الطبقة غير المنفذة للماء أو ينساب خلالها ولكن ببطء شديد . ولكن ينساب الماء تحت ضغط خلال الطبقة المنفذة والحاوية للماء والمحصورة من أعلى ومن أسفل بالطبقات غير المنفذة . وتمنع الطبقات غير المنفذة ، والتي تقع فوق مكامن الماء المحصور ، مياه الأمطار من التسرب إلى أسفل . ويتم إعادة ملء مكامن الماء المحصور من تساقط الماء فوق منكهفه ، حيث تدخل مياه الأمطار إلى الأرض وتنتقل لأسفل إلى مكامن المياه الجوفية (شكل 10.13) ، حيث يكون انسياب الماء تحت ضغط . ويعرف هذا الانسياب بأنه انسياب ارتوازي **artesian flow** ويكون الضغط عند أي نقطة في مكامن الماء مساويا لوزن كل الماء فوق تلك النقطة . فإذا خُيرَ بشر في مكامن ماء

الأرضية . فإذا كانت المسافة المفتوحة بين الحبيبات المتجاورة في الصخر صغيرة بدرجة ملحوظة فإن الغلالات الرقيقة من الماء والملتصقة بالحبيبات تتلاصق مع بعضها البعض . لذلك يمتد تأثير قوة الالتصاق الجزيئي عبر المسام (شكل 9.13) . وعند الضغوط العادية يلتصق بعض هذا الماء بقوة بجدران الحبيبات ، ولذلك تكون النفاذية منخفضة . والصلصال هو مثال لتلك الرواسب ، حيث يبلغ حجم حبيباته أقل من 0.005 مم . وعلى الرغم من أن الصلصال عالي المسامية إلا أن الحجم الصغير جدا للمسام يجعل نفاذية الصلصال منخفضة . وعلى العكس من ذلك ، ففى الرواسب التي تحتوى على حبيبات كبيرة مثل الرمل (حجم الحبيبة بين 0.06 إلى 2 مم) فإن المسام تكون عادة أكبر من سمك غلالات الماء الملتصقة بالحبيبات المتجاورة . ولذلك فإن المياه في مركز المسام تكون حرة الحركة (شكل 9.13) ، ومثل هذه الرواسب تكون منفذة . وتزداد النفاذية بزيادة أقطار المسام ، وبالتالي فإن الجروول يكون أكثر نفاذية من الرمل لوجود مسام كبيرة جدا به ، ولذا يمكن ضخ كميات كبيرة من الماء منه .



شكل (10.13): شكل توضيحي لبيان الظروف التركيبية اللازمة لتكون آباراً ارتوازية .

يلزم تحقق شرطان لتكون نظام ارتوازي هما وجود مكن مائي aquifer مائل وضغط مائي يكفي لرفع الماء في البئر فوق المكن المائي ، بالإضافة إلى أن حافة منطقة إعادة للماء تكون مكشوفة .

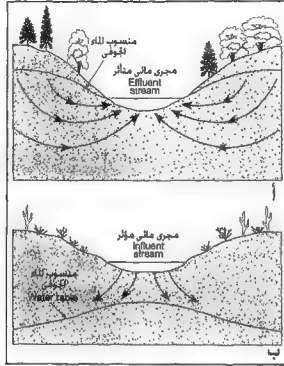
(After Holmes, D.L., 1984: Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson, Great Britain).

يطلق عليهما عمليات إعادة الماء والتصريف . فعملية إعادة الماء **recharge** هي تحلل الماء في أى متكون صخري تحت سطح الأرض . ويتم غالباً إعادة الماء من رشح ماء المطر أو الجليد المنصهر من سطح الأرض . وقد يعاد الماء أيضاً من خلال قاع مجرى مائي ، حيث تقع قناة المجرى المائي عند مستوى أعلى من منسوب المياه الجوفية . ويسمى المجرى المائي الذي تسرب مياهه لتغذي نطاق التشبع تحت بمجرى مائي مؤثر (نهر مغذي) **influant stream** . ويندر وجود الأنهار المغذية في المناطق القاحلة ، حيث يكون منسوب المياه الجوفية عميقاً (شكل 11.13 أ) . وفي مصر يعتبر نهر النيل مجرى مائي مؤثراً ، حيث تعتمد المياه الجوفية في مكن المغرة **Moghra aquifer** (والذي يمتد لمسافات شاسعة غرب دلتا نهر النيل) على التسرب من نهر النيل . ولذلك تكون ملوحة الماء منخفضة قرب دلتا نهر النيل (حوالي 350 جزءاً في المليون) ثم تزداد بالتدرج غرباً لتصل إلى حوالي 10000 جزءاً في المليون .

محصور عند نقطة بحيث يكون ارتفاع سطح الأرض أقل من ارتفاع منسوب المياه الجوفية في منطقة إعادة الماء ، فإن الماء ينساب خارج البئر تلقائياً . وتعرف مثل هذه الآبار بالآبار الارتوازية **artesian wells** . ولا تحتاج مثل هذه الآبار إلى طاقة لضخ الماء إلى السطح ، حيث يسبب الفرق في الضغط بين منسوب الماء الأرضي عند منطقة إعادة الماء ومستوى البئر أن يرتفع الماء في البئر . ويأتي مصطلح ارتوازي **artesian** من اسم المدينة الفرنسية أرتوا **Artois** والتي تم فيها دراسة الانسياب الارتوازي لأول مرة . وبالمثل ، فإن الينبوع المنساب طبيعياً من مكن ماء ارتوازي يعرف بأنه ينبوع ارتوازي **artesian spring** . وتحت بعض الظروف غير العادية ، فإن ضغط الماء الارتوازي قد يكون مرتفعاً بدرجة تؤدي إلى تكون نافورات ترتفع إلى 60 متراً فوق سطح الأرض .

IV. العلاقة بين مكامن المياه الجوفية والمياه السطحية

يدخل الماء إلى نطاق التشبع ويغادره في عمليتين



شكل (11.13):

(أ) مجرى مائي متأثر يميز المناطق الرطبة ، حيث يغذي المجرى المائي من الماء الجوفي.

(ب) مجرى مائي مؤثر (نهر مغذي) يوجد في الصحارى . ويعمل الماء من تلك المجارى المائية على رفع منسوب الماء الجوفي .

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition, Macmillan Publishing Company, New York).

من المجارى المائية المؤثرة ، بينما يستنفد بالمجارى المائية المتأثرة .

أ. التوازن بين إعادة الملء والتصريف

عندما تتوازن عمليتا إعادة الملء والتصريف ، فإن خزان المياه الجوفية ومنسوبه يقيان ثابتين في الظروف الطبيعية ، حتى مع استمرار انسياب الماء إلى الخزان . ولكي تتوازن عمليتا إعادة الملء والتصريف فإن ماء المطر يجب أن يكون متكرراً باستمرار بدرجة تكفى لتعادل كمية الماء المنصرف من الأنهار ، بالإضافة إلى الماء المتدفق من الآبار والينابيع . وحيث إن كميات التساقط تتغير من فصل لآخر ، فإن التوازن بين إعادة الملء والتصريف لن يبقى ثابتاً . وعموماً فإن مستوى الماء

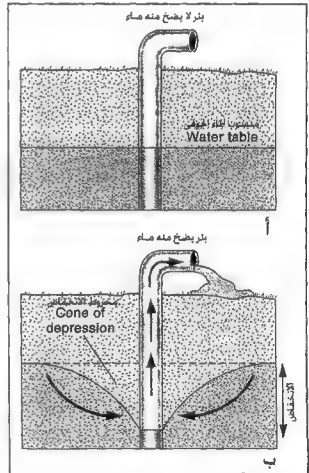
أما التصريف **discharge** فهو عكس إعادة الملء ، وهو مصطلح يطلق على عملية خروج الماء الجوفي من نطاق التشبع إلى المجارى المائية أو البحيرات أو المستنقعات عند السطح . وعندما تقطع قناة مجرى مائي منسوب المياه الجوفية ، ينصرف الماء من نطاق التشبع إلى المجرى المائي . ويلاحظ أن قاع المجرى المائي يقع في منسوب منخفض عن منسوب المياه الجوفية . ويميز المجرى المائي المتأثر **effluent stream** المناطق الرطبة (شكل 11.13ب) . وتستمر المجارى المائية المتأثرة في الانسياب لفترة طويلة حتى بعد توقف سقوط الأمطار ، حيث تُغذى من المياه الجوفية . وهكذا فإن خزان الماء الجوفي قد يزود بالماء

خزان الماء الجوفي فإن زيادة عمق البئر في الخزان تسمح لمزيد من الماء بالتدفق من البئر ، حتى عند معدلات ضخ عالية . وإذا زاد عمق البئر إلى الدرجة التي يستنفد بها كل خزان الماء الجوفي ، واستمرت عملية الضخ ، فإن مخروط الانخفاض يمكن أن يصل إلى قاع خزان الماء الجوفي ويستنفده . ويتحسن وضع خزان الماء الجوفي بخفض معدل الضخ بدرجة تكفي لإعادة ملء الماء .

ولا يؤدي السحب الشديد للماء لاستنفاد ماء الخزان الجوفي فقط ، ولكن قد يسبب تأثيراً آخر غير مرغوب فيه . حيث تهبط المواد التي كانت تعلو خزان الماء الجوفي في السابق وينخفض سطح الأرض نتيجة لذلك بسبب انخفاض ضغط الماء في المسام . ويعتمد مقدار الهبوط على مدى انخفاض ضغط الماء وعلى سمك خزان الماء الجوفي ومدى ضغط الرواسب فيه . ويتشرب هبوط سطح الأرض في جنوب غرب الولايات المتحدة الأمريكية حيث أدى ضخ وزيادة سحب الماء الجوفي إلى تمزق سطح الأرض وانهار المباني والطرق والجسور وتخريب الكابلات الكهربائية المدفونة وأنابيب الصرف وزيادة المساحات المعرضة للجفاف .

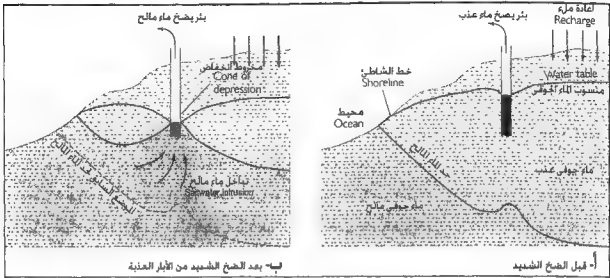
وقد يكون انخفاض سطح الأرض مدمراً خاصة عندما يُضخ الماء من تحت المدن . ومن الأمثلة المشهورة على ذلك مدينة مكسيكو سيتي ، حيث أدى ضخ الماء من الرواسب إلى تحرك عديد من المباني وميلها نتيجة هبوط سطح الأرض . ويمثل برج بيزا المائل الشهير في إيطاليا والذي مال بسبب هبوط سطح الأرض مثالا آخر ، حيث بُني البرج على سهل فيضي مكون من رواسب دقيقة الحبيبات . وبدأ البرج في الميل نتيجة السحب المتزايد للمياه الجوفية من خزانات المياه العميقة المحيطة به . وقد أُعد تصميم لتقوية الأساسات لتحفظ البرج مستقراً في المستقبل ، ولكن مع ضرورة الحفاظ على المستوى نفسه من التحكم في المياه الجوفية .

الجوفي ينخفض في الفصول الجافة ويرتفع في الفترات الرطبة (شكل 12.13) . كما تؤدي زيادة التصريف ، والتي تحدث عادة نتيجة زيادة الضخ من الآبار إلى عدم الاتزان . وقد تنتهي الآبار الضحلة عندما يكون ضخ الماء من البئر أسرع من إعادة تزويد خزان الماء الجوفي بالماء فينخفض مستوى الماء في البئر على شكل مساحة مخروطية تحيط بالبئر ، تعرف بمخروط الانخفاض cone of depression (شكل 12.13) ، وينخفض مستوى الماء في البئر إلى المستوى المنخفض لمنسوب الماء الجوفي . وإذا امتد مخروط الانخفاض تحت قاع البئر أصيب البئر بالجفاف . وإذا كان قاع البئر فوق قاعدة



شكل (12.13): يؤدي ضخ الماء من البئر إلى انخفاض منسوب الماء الجوفي في هيئة مخروط يحيط بالبئر ويمرر بمخروط الانخفاض.

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2004: Physical Geology, 4th edition.



شكل (13.13) يتحدد الحد الفاصل بين الماء العذب والمالح على امتداد خط الشاطئ من التوازن بين إعادة الملء recharge والتصريف discharge في خزان الماء العذب .

(أ) وفي العادة ، فإن ضغط الماء العذب يحفظ حد الماء المالح في اتجاه البحر قليلا .

(ب) يعمل الضخ الشديد على خفض ضغط الماء العذب ، مما يسمح لحد الماء المالح بالتحرك جهة اليابسة . ويؤدي هذا التحرك ليس فقط إلى تكون مخروط انخفاض محيط البئر ، ولكن إلى تكون مخروط انخفاض آخر مقلوب يدخل الماء المالح في البئر . وينتقل بالتالي البئر الذي كان يضخ ماء عذبا إلى أن يضخ ماء مالحا .

(After Press, F. and Sleever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

صغير ولكن مهم) . وبالطبع فإن ضغط الماء العذب يحافظ على حد الماء المالح بعيدا قليلا عن الشاطئ .

ويحافظ التوازن بين إعادة الملء والتصريف في خزانات الماء العذب على هذا الحد الفاصل بين الماء العذب والماء المالح ، طالما أن إعادة الملء بسبب المطر تكافئ التصريف بالضخ على الأقل مما يؤدي إلى أن يضخ البئر ماء عذبا . ولكن عندما يكون سحب الماء أسرع من إعادة الملء فإنه يتكون مخروط انخفاض عند قمة خزان الماء الجوفي يقابله مخروط آخر مقلوب يرتفع من أسفل الحد بين الماء العذب والماء المالح . ويؤدي مخروط الانخفاض عند الجزء العلوي من خزان الماء الجوفي إلى صعوبة ضخ ماء عذب ، بينما يؤدي المخروط السفلي إلى تسرب ماء مالح عند قاعدة البئر (شكل

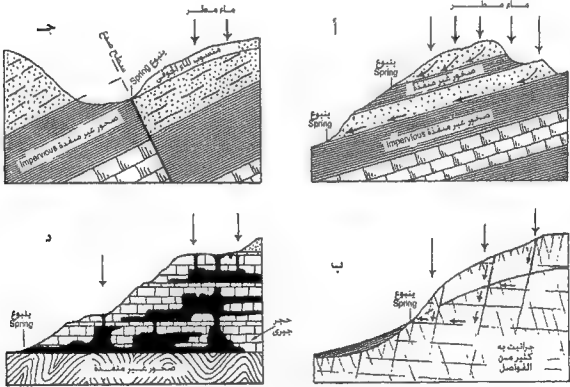
ويواجه السكان الذين يعيشون بالقرب من الشواطئ المطلة على المحيطات والبحار مشكلة أخرى حينما يكون معدل الضخ مرتفعا بالنسبة لإعادة الملء ، مما يؤدي إلى غزو ماء البحر للآبار كما سبق شرحه . ويوجد بالقرب من خط الشاطئ (أو في منطقة الساحل المغمور على مسافة من الشاطئ) حد يفصل بين الماء المالح والماء العذب تحت سطح الأرض ، بحيث يتحد هذا الحد ناحية اليابسة وأسفلها ، ويعلو الماء العذب فوق الماء المالح في خزان الماء الجوفي (شكل 13.13 أ) . ويوجد الماء الجوفي العذب تحت عدد من الجزر في المحيط على هيئة عدسات تطفو فوق قاعدة من ماء البحر ، لأن الماء العذب يكون أقل كثافة من ماء البحر (1.00 جم/سم³ مقابل 1.02 جم/سم³ وهذا فرق

1. الينابيع

يعرف الينابيع **spring** بأنه انسياب المياه الجوفية بحيث ينفذ طبيعياً عند سطح الأرض . وأبسط أنواع الينابيع هو الذي ينفذ عندما يتقاطع سطح الأرض مع منسوب المياه الجوفية (شكل 14.13). ويمكن أن توجد الينابيع الصغيرة في كل أنواع الصخور ، ولكن معظم الينابيع الكبيرة تخرج غالباً من اللابة أو الحجر الجيري أو الجروول .

13.13 ب) . ويكون السكان المقيمون بالقرب من شاطئ البحر أول من يتأثر بزيادة ملوحة الماء ، حيث لا يمكن التغلب على تلك المشكلة إلا بتقليل ضخ الماء أو إعادة ملء خزان الماء الجوفي صناعياً من المياه الجارية.

ب. التصريف الطبيعي (الينابيع) والصناعي (الآبار)
يحصل الناس عموماً على احتياجاتهم من المياه الجوفية إما من الينابيع الطبيعية أو بحفر الآبار التي تصل إلى خزان الماء تحت سطح الأرض . ونعرض هنا لكلا هذين النوعين من أنواع التصريف :



شكل (14.13). شكل الظروف المختلفة التي تؤدي إلى تكون العيون أو الينابيع **spring** .

أ. يتخلل الماء طبقات الرمل المسامي التي تعلوها طبقة من الفصل معدودة النفاذية فينساب الماء جانبياً وينفذ كينبوع .

ب. يدخل الماء في صخر كتل كالجرانيت به كثير من الفواصل ليخرج منها الماء .

ج. يتسبب الصدع في وجود طبقة منفذة أمام الطفل غير المنفذ ، فيحتجز الماء ويخرج على امتداد سطح الصدع .

د. يدخل الماء في فواصل الحجر الجيري ، فتتسع تلك الفواصل بمرور الوقت بسبب ذوبان الحجر الجيري حولها ، وتتكون كهوف وفراغات تحت سطح الأرض ، ويتجمع فيها الماء ويخرج كينبوع .

(After Holmes, D.L., 1984: Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson, Great Britain).

وعندما يبدأ ضخ الماء من بئر جديدة ، فإن معدل السحب يزيد في البداية عن معدل انسياب المياه الجوفية محليا . وكما ذكرنا سابقاً ، فإن عدم الاتزان في معدلات الانسياب يؤدي إلى تكوّن انخفاض مخروطى في منسوب المياه الجوفية يحيط مباشرة بالبئر ، ويسمى مخروط الانخفاض cone of depression (شكل 12.13).

٧. نوعية (درجة جودة) الماء وتلوث المياه الجوفية

يعتقد قاطنو المناطق الصناعية الحديثة أن ماء الصنبور آمن وصالح للشرب . ولكن ماء الشرب قد يكون ملوثاً بشدة ولا يصلح للاستهلاك الأدمى بسبب وجود مواد ذائبة به مصدرها النفايات الأدمية والصناعية.

أ. كيميائية المياه الجوفية

تُظهر تحاليل عديد من الآبار والينابيع أن المركبات الذائبة في الماء الجوفى هي أساساً كلوريدات وكبريتات وبيكربونات لعناصر الكالسيوم والمغنسيوم والصوديوم والبوتاسيوم والحديد ، وترجع آثار هذه المواد إلى المعادن الشائعة في الصخور والتي تم تآكلها . ويتغير تركيب المياه الجوفية كما هو متوقع ، من مكان لآخر ، حسب نوعية الصخر الذى يتواجد به الماء . ففى وسط الولايات المتحدة الأمريكية يكون معظم الماء غنياً ببيكربونات الكالسيوم والمغنسيوم والتي أذيت من صخور الحجر الجيري وحجر الدولوميت في تلك المناطق . وعند استخدام مثل هذا الماء ، والذي يسمى ماء عسر hard water فإنه لا يكون رغوة مع الصابون بسهولة ، بينما يكون قشوراً في الغلايات عندما يتبخّر منها ، كما قد تتكون مثل هذه القشور في أنابيب المياه ، مما يقلل في النهاية من انسياب الماء . وعلى عكس الماء العسر ، فإن الماء الذى يحتوي على القليل من

ويكون التغير الأفقى أو الرأسى في النفاذية سبباً شائعاً لوجود الينابيع (شكل 10.13). وغالباً ما ينتج هذا التغير في النفاذية عن وجود جسم من صخر غير منفذ أو أقل نفاذية بدرجة كبيرة مجاور لصخر آخر منفذ. فإذا كان هناك رمل مسامى يعلو حائساً للماء مكون من صلصال أقل نسبياً في درجة النفاذية ، فإن الماء المتخلل لأسفل خلال الرمل ينساب جانبياً حينما يصل إلى الصلصال الموجود أسفله ، حيث ينفذ كينبوع. ويقطع الحد الاستراتيجرافى (الطبقي) بين الوجدتين سطح الأرض ، على امتداد جانب وادى أو جرف cliff (شكل 14.13 أ) . وقد تنفذ الينابيع أيضاً من صخر ناري كتل مثل الجرانيت به كثير من الفواصل (شكل 14.13 ب) . كما توجد الينابيع أيضاً على امتداد خطوط الصدوع (شكل 14.13 جـ) ، أو في صخور بها كهوف مثل الحجر الجيري (شكل 14.10 د) ، مثل تلك التي توجد في واحة سيوة وجنوب القطارة وحلوان ووادى الريان بمصر . وقد أظهرت الدراسات وجود أكثر من 1400 ينبوع بمصر يتدفق منها الماء بدرجات متفاوتة ، كما تختلف في درجات حرارتها ، وقد تصل إلى 70°م فوق سطح الأرض ، مثل تلك التي توجد في ينبوع حمام فرعون على الجانب الشرقى لخليج السويس والعين السخنة على الجانب الغربى لخليج السويس وبئر قفار في منخفض القطارة .

2. الآبار

البئر well هو حفرة صناعية دائرية عادة ومبطنة الجوانب ، حفر إلى عمق كبير تحت منسوب المياه الجوفية يُسحب أو يُضخّ الماء منها إلى سطح الأرض . ويوضح شكل (3.13) أن البئر الضحل يجفّ عندما يصبح منسوب المياه الجوفية منخفضاً ، بينما ينتج البئر العميق المجاور الماء على طول العام .

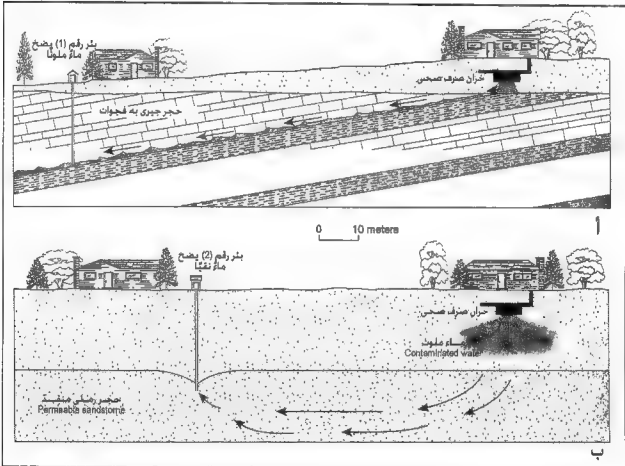
الرغم من أنه غير ضار صحياً . وفي بعض المناطق القاحلة ، فإن تركيز الكبريتات والكلوريدات المذابة قد يكون عالياً لدرجة أن الماء الجوفى يكون ضاراً بالصحة . وفي المناطق الجافة (القاحلة) يذيب الماء الجوفى المتحرك في صخور رسوبية مسامية الأملاح التي ترسب نتيجة بخر الماء في نطاق التهوية ، مما يؤدي إلى تكون تربة مالحة غير صالحة للزراعة .

ب. التلوث بمخلفات المجارى

تعتبر مخلفات المجارى أكثر مصادر تلوث المياه الجوفية شيوعاً . ويؤدي التسرب من خزانات المجارى

المواد المذابة وكذلك القليل من الكالسيوم يسمى ماءً يسهراً *soft water* ، وهو ماء يكون رغوة مع الصابون العادى بسهولة . ويتواجد مثل هذا الماء في وادى النيل والدلتا حيث تكثر الصخور البركانية وصخور الجربواكى في مناطق منابع النيل .

ويذيب الماء الجوفى عناصر ضارة بالصحة من الصخور التي ينساب خلالها مما يجعل الماء غير مناسب للاستهلاك الأدمى . فالماء الذى يتخلل صخوراً غنية في الكبريت قد يحتوى على كبريتيد الهيدروجين (H_2S) والذي يجعل له رائحة مثل رائحة البيض الفاسد ، على



شكل (15.13):

أ. على الرغم من أن الماء الملوث يتحرك لمسافة تزيد عن 100 متر قبل أن تصل إلى البئر ، إلا أن الماء يتحرك بسرعة خلال الحجر الجيرى المليء بالفجوات دون أن ينقى من الشوائب .

ب. يتخلل الماء الملوث في حجر رملى منفذ وينقى خلال مسافة قصيرة نسبياً .

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

نفسه. وغالباً ما تكون هذه الملوثات سامة للإنسان والنباتات والحيوانات أيضاً. وقد أصبحت مشكلات التلوث في مواقع النفايات المطمورة (المرادم البرية) خطيرة لدرجة أن عدداً من الحكومات بدأت برامج طويلة الأمد لتنظيف هذه المواقع حتى تصبح آمنة بيئياً.

وتُرش الحقول بالكثير من المبيدات لمقاومة الحشرات والطحالب لتحسين نوعية الإنتاج. وقد ارتبطت بعض هذه الكيماويات بالأمراض الحبيشة والتخلف العقلي في الإنسان، كما أدى بعضها إلى نقص أعداد الحيوانات البرية، حيث حدث أيضاً انخفاض كبير في أعداد طائر « أبو قردان » نتيجة رش المبيدات في مصر. وتصل هذه الكيماويات السامة إلى المياه الجوفية بسبب الأسلوب الذي ترش به هذه المبيدات على مساحات شاسعة.

د. تخزين النفايات الخطرة تحت الأرض

إن أحد المشاكل البيئية التي تقلق الدول الصناعية، ضرورة التعامل مع المخلفات الصناعية شديدة السمية. ويؤدي الطمر (الدفن) السطحي السريع إلى تلوث مصادر المياه السطحية وتحت السطحية، وبالتالي إمكانية حدوث مشكلات صحية خطيرة. كما أن الدول ذات الإمكانات النووية لها مشاكلها الخاصة بالتخلص من نواتج النفايات ذات الإشعاع العالي الدرجة. فبعض النظائر مثل ^{90}Sr و ^{137}Ce تكون مشعة بدرجة عالية لدرجة أن أي كمية ضئيلة منها يمكن أن تسبب وفاة الناس إذا تركزت في البيئات السطحية.

وقد توصلت معظم الدراسات الخاصة بالتخلص من النفايات السامة - سواء السامة أو المشعة - إلى أن التخزين تحت الأرض يكون مناسباً عند وجود أماكن آمنة. فالشرط الأساسي في حالة النفايات المشعة

وشبكاتها غير المحكمة، وإلقاء المخلفات في المناطق المفتوحة إلى تلوث المياه الجوفية. وعند مرور المياه الملوثة بكميات مخلفات المجارى على صخر أو راسب ذي مسام كبيرة مثل جروول خشن أو حجر جيري به كثير من الفجوات البينية الواسعة فإن الماء يتخلل بها لمسافات كبيرة ولكنه يبقى ملوثاً (شكل 15.13 أ). ومن ناحية أخرى، فإن الماء الملوث إذا تخلل في رمل أو حجر رملي منفذ، فإنه قد ينقى خلال مسافة قصيرة، قد تصل في بعض الأحيان إلى أقل من 30 متراً من موقع حدوث التلوث (شكل 15.13 ب). ويعتبر الرمل عامل تنقية مناسب حيث يُنقى الماء من خلال (1) الترشيح ميكانيكياً، حيث يتم التخلص من معظم البكتريا عند مرور الماء في الرمل، (2) أكسدة البكتريا بحيث تصبح غير ضارة، (3) يؤدي تلامس البكتريا مع كائنات عضوية أخرى إلى التهام البكتريا. ولذلك، فإن مشروعات تنقية مصادر المياه ومخلفات المجارى تعتمد على تخلل هذه السوائل في الرمل.

ج. النفايات السامة والسوم الزراعية

تلقى في كل عام كميات ضخمة من النفايات البشرية والصناعية في أماكن مفتوحة أو تُدفن تحت سطح الأرض بتلك الأماكن التي يطلق عليها المرادم البرية landfill. وعندما يمثل هذا المردم البري، فإنه يُغطى بالأوساخ، وتسرب مياه الأمطار في رواسب المردم، فتتحرك وتنتقل العديد من نواتج هذه النفايات تحت سطح الأرض، حيث تحمل المياه المواد الذائبة بعيداً. وبهذه الطريقة، فإن الكيماويات السامة تُرشح ببطء لتدخل مكامن المياه الجوفية وتلوثها، مما يجعل هذه المياه غير مناسبة للاستخدام الآدمي. وتنتقل الملوثات من هذه المواقع على هيئة تيارات من الماء الملوث في اتجاهات تعتمد أساساً على نمط الانسياب الإقليمي للماء الجوفي لتنتشر بمعدل انتشار المياه المتخللة

٧١. العمل الجيولوجي للمياه الجوفية

تعمل المياه الجوفية في المناطق المغطاة بصخور معرضة للتجوية الكيميائية على تكون معالم أرضية مميزة تعتبر من أكثر معالم القشرة الأرضية جمالاً وروعة. ونعرض هنا بعضاً من هذه المعالم .

أ. الذوبان

عندما تصل مياه الأمطار إلى سطح الأرض تبدأ في التفاعل مع المعادن في الحطام الصخري (الأديم) وصخور الأساس وتعمل على تجويتها كيميائياً . ومن العمليات المهمة المترتبة على تلك التجوية الكيميائية ذوبان المعادن والصخور في السوائل المارة خلالها . وتعتبر الصخور الكربونانية أكثر صخور القشرة الأرضية قابلية للتأثر بهذه العملية . وصخور الحجر الجيري وحجر الدولوميت والرخام هي أكثر صخور الكربونات شيوعاً ، حيث تغطي ملايين الكيلومترات المربعة من سطح الأرض . وبالرغم من أن معادن الكربونات تكون غير قابلة للذوبان تقريباً في المياه النقية ، إلا أنها تذوب بسهولة في حامض الكربونيك (انظر الفصل السابع) الذائب في ماء المطر المتخلل . ونتيجة لذلك ، فإن المياه الجوفية تصبح حملة بكاتيونات الكالسيوم وأنيونات البيكربونات . وتحدث التجوية أساساً على امتداد الفواصل والكسور الأخرى في صخور الأساس الكربونانية ، حيث تكون النتيجة مؤثرة . وقد تؤدي تجوية الحجر الجيري إلى أن يذوب تماماً وينتقل إلى المياه الجوفية المتحركة ببطء .

وقد قدر الجيولوجيون المعدل الذي تنخفض به طوبوغرافية الصخور الكربونانية نتيجة الذوبان ، فوجدوا أنها تنخفض بمعدل يصل إلى 10 مم/ 1000 سنة في المناطق المعتدلة التي تتساقط فيها الأمطار بمعدل عال وتتميز بمنسوب ماء جوفي مرتفع مع غطاء دائم تقريباً من النباتات . وتكون هذه المعدلات

بدرجة عالية والتي يمكن أن تبقى خطيرة لعشرات أو مئات أو آلاف السنين بسبب فترة نصف - العمر الطويل لبعض النظائر المشعة ، أن يكون الموقع مستقراً على مدى زمني طويل . لذلك ، فإن المناطق الآمنة تماماً للتخلص من النفايات المشعة والحاويات التي توضع فيها تلك النفايات هي المناطق التي لا تتأثر كيميائياً بالمياه الجوفية ، كما لا تتأثر طبيعياً بالزلازل أو بالنشاط البشري .

وهناك اتفاق عام بين الجيولوجيين على أن تخزين النفايات المشعة تحت الأرض لابد أن يخضع للشروط التالية:

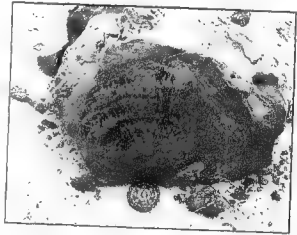
1. يجب أن تكون نفاذية الصخور منخفضة أو منعقدة ، وأن تكون الكسور بها قليلة أو منعقدة .
2. يجب ألا تكون هناك إمكانية لتواجد خامات معدنية ذات قيمة اقتصادية في الصخر الحاروي سواء حالياً أو مستقبلاً .
3. يجب أن يكون انسياب الماء الجوفي المحل بعيداً عن الغلاف الحيوي .
4. يجب أن تكون كمية الأمطار المتساقطة قليلة .
5. يجب أن يكون نطاق التهوية سميكا .
6. يجب أن يكون معدل التعرية بطيئاً جداً .
7. يجب أن يكون احتمال النشاط الزلزالي أو البركاني منخفضاً جداً .

ويمثل التخزين الآمن لفترة طويلة تحت الأرض تحدياً كبيراً للجيولوجيين ، حيث درس الجيولوجيون الأحداث الماضية ، وهم مطالبون الآن بالتنبؤ بأحداث المستقبل الممكنة . ويتطلب ذلك معرفة جيدة بمدى استجابة أنظمة الماء الجوفي المعقدة لحركات القشرة والتغيرات المناخية المحلية والعالمية والعوامل الطبيعية الأخرى التي يمكن أن تؤثر على استقرار موقع التخزين .

منخفضة جداً في المناطق الجافة التي تنذر فيها الأمطار ، ويكون منسوب الماء الجوفي فيها منخفضاً ، والغطاء النباتي غير دائم .

ب. التلاحم والإحلال الكيميائي

إن تحول الرواسب إلى صخر رسوبي يكون أساساً نتيجة عمل المياه الجوفية . ومثلما تكون الرواسب المتواجدة تحت البحر مشبعة عموماً بالماء ، كذلك تكون الرواسب المتواجدة في نطاق التشبع تحت سطح الأرض . وتترسب المواد الذائبة في الماء كإحالة في الفراغات بين حبيبات الصخور وحبيبات المعادن في الرواسب . وكما أوضحنا في فصل الصخور الرسوبية ، فإن هذه العملية تسمى عملية مابعد الترسيب *diagenesis* وهي تحول الرواسب المفككة إلى صخر متماسك . ويعتبر الكالسيت والكوارتز ومركبات الحديد (أساساً هيدروكسيدات مثل الليمونيت) مواد لائحة أساسية .



شكل (16.13): الخشب المتحجر من الأوليوسين في مصر . طريق الواحات البحرية - الصحراء الغربية - مصر (د. ضياء الدين محمد كامل - قسم الجيولوجيا - جامعة الأزهر) .

والعملية الأقل شيوعاً من ترسيب المادة اللائحة بين حبيبات الرواسب هي عملية الإحلال *replacement* ، وهي العملية التي يذيب فيها السائل المادة الموجودة وقت الإحلال ويُرسب من

المحلول في الوقت نفسه حجماً مساوياً من مادة مختلفة . ومن الواضح أن عملية الإحلال تحدث على أساس إحلال حجم ما مكان حجم آخر مساو ، حيث تحفظ المادة الجديدة أدق أنسجة المادة التي تم إذابتها وإحلالها . ويمكن أن يتم إحلال كل من المواد المعدنية والعضوية ، فالخشب المتحجر *petrified wood* هو أشهر أمثلة إحلال المادة العضوية (شكل 16.13) .

ج. الكهوف والمغارات الكربوناتية

جذبت الكهوف *caves* اهتمام الناس منذ أمد طويل . وتعتبر كهوف الحجر الجيري في أوروبا وآسيا من أقدم الشواهد على إقامة إنسان العصر الحجري القديم في الكهوف خلال أزمنة البليستوسين الجليدية ، حيث كانت حوائط هذه الكهوف محل فحص دقيق من المختصين والمهتمين بعصور ما قبل التاريخ .

وتأخذ الكهوف عدة أحجام وأشكال . وعلى الرغم من أن معظم الكهوف تكون صغيرة ، إلا أن بعضها يكون ذا أحجام استثنائية . ويسمى الكهف الكبير جداً أو المكون من عدة حجرات كهفية متصلة ببعضها بالمغارة *cavern* . وتضم مغارات كارلسباد في نيومكسيكو حجرة واحدة يبلغ طولها 1200 م وعرضها 190 م وارتفاعها 100 م . ويتكون كهف ماموث في كنتكي من عدة مغارات متصلة يبلغ طولها الإجمالي حوالي 48 كم على الأقل .

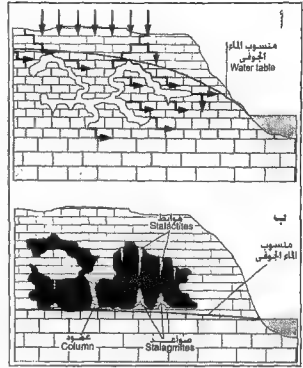
يتكون الكهف نتيجة لعملية كيميائية أساساً تتضمن إذابة صخر كربوناتى بالمياه الجوفية المتخللة والغنية بثاني أكسيد الكربون (شكل 17.13) . وكما رأينا عند دراستنا للصخور الرسوبية ، فإن معدل إذابة الحجر الجيري يزداد نتيجة وجود ثاني أكسيد كربون الغلاف الجوي الذائب في مياه الأمطار . وقد تلتقط المياه المتسربة في التربة المزيد من غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج من جذور النباتات والبكتريا

الذى يستغرقه تكوّن حمر متصل بالمياه المتخللة البطيئة بحوالى 10000 سنة ، بينما يستغرق زيادة اتساع المر بالماء المناسب بسرعة في نظام من الكهوف من 10000 إلى مليون سنة إضافية.

وعلى الرغم من الاعتقاد بأن تكوّن الكهوف يتضمن عموماً الإذابة بواسطة حامض الكربونيك، إلا أن بعض الدراسات تقترح أن بعض الكهوف بما فيها مغارات كارلسباد Carlsbad caverns قد تتكون نتيجة الإذابة بحامض الكبريتيك ؛ حيث افترض أن السوائل التى تخشى على كبريتيد الهيدروجين والمستمدة من رواسب غنية بالترول تصعد على امتداد الفواصل لتقابل وتتفاعل مع الماء المحمل بالأكسجين لتكون حامض الكبريتيك الذى يذيب الحجر الجيرى.

د. رواسب الكهوف

يمكن للجولوجيين الآن استكشاف الكهوف التى أذيت يوماً ما تحت منسوب الماء الجوفى ، ولكنها توجد الآن في نطاق عدم التشبع نتيجة انخفاض مستوى الماء الجوفى . ففي هذه الكهوف ، قد تساقط من السقف قطرات من ماء مشبع بكاربونات الكالسيوم. وعندما تسرب كل نقطة من الماء من سقف الكهف ، فإن بعضاً من ثنائي أكسيد الكربون الذائب والذى تم التقاطه عند تسرب الماء في التربة سوف يتبخر ليهرب إلى هواء الكهف . وعندما يحدث هذا ، فإن كربونات الكالسيوم الموجودة في الماء الجوفى تصبح أقل ذوباناً ، ليرسب من كل نقطة صغيرة كمية ضئيلة من كربونات الكالسيوم على السقف . وتتراكم هذه القطرات الصغيرة على هيئة خروط أو اسطوانة كربوناته تسمى هابط stalactite تتدلى من سقف الكهف (شكل 18.13). وعندما تقع بقية النقطة على أرضية الكهف، فإن المزيد من ثنائي أكسيد الكربون يهرب وترسب كمية صغيرة أخرى من كربونات الكالسيوم على



شكل (17.13): إذابة الحجر الجيري ليكون كهوفاً .
أ. يتحرك الماء عبر الشقوق وأسطح الطباقية في الحجر الجيري ، مذيباً الحجر الجيري تحت منسوب الماء الجوفى .

ب. يؤدي انخفاض منسوب الماء الجوفى إلى تكون نظام من الكهوف يملؤه الهواء . ويؤدي ترسب الكالسيوم إلى تكوين الصواعد والهوابط والأعمدة فوق منسوب الماء الجوفى .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlson, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

والكائنات العضوية المتواجدة في التربة . وعندما ينتقل هذا الماء الغنى بثنائي أكسيد الكربون لأسفل إلى منسوب الماء الجوفى عبر نطاق عدم التشبع إلى نطاق التشبع ، فإنه يؤدي إلى تكون فجوات نتيجة إذابة المصادن الكربوناته . ويزيد اتساع تلك الفجوات بذوبان الحجر الجيري على امتداد الفواصل والكسور لتتكون شبكة من الحجرات والممرات . وتكون هذه الشبكات أكثر ما يكون في نطاق التشبع ، حيث تكون الكهوف ممتلئة بالماء وتتم الإذابة على جميع الأسطح بما فيها الأرضيات والحوائط والأسقف. وقد قُدر الزمن

وهي تشبه القمع في العادة . وتتكون الحفر البالوعية نتيجة إذابة وانهار أسقف كهوف الحجر الجيري ، بينما يتكون بعضها الآخر عند سطح الأرض ، حيث يكون الماء الذائب به ثنائي أكسيد كربون حديثاً ومؤثراً كمنذوب للمواد الكربوناتيّة . ويوجد عديد من الحفر البالوعية عند تقاطع الفواصل حيث يتحرك الماء لأسفل بسرعة أكبر ، وتتكون بذلك حفر بالوعية تشبه القمع .

أرضية الكهف أسفل الهابط ، وتتجمع هذه الرواسب أيضاً مكونة الصاعد stalagmite . وأخيراً ، فقد ينمو الصاعد والهابط مع بعضهما ليكونا عموداً واحداً . هـ. الحفر البالوعية

تعرف الحفرة البالوعية sinkhole بأنها منخفض دائري صغير وعميق في سطح الأرض فوق صخور كربوناتيّة بها الكثير من الكهوف (شكل 19.13) . وتقاس الحفر البالوعية بالأمطار أو بعشرات الأمطار ،



شكل (18.13): الخوابط stalactites والصواعد stalagmites في كهف الجارة في الصحراء الغربية المصرية (أ.د. محمود محمد عاشور ، قسم الجغرافيا - جامعة عين شمس) .

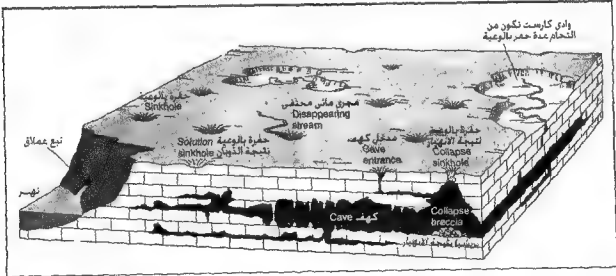
و. طوبوغرافية الكارست

- 1- مناخ يتميز بوفرة الأمطار وارتفاع درجة الحرارة بدرجة تساعد على الذوبان مع وجود غطاء نباتي كثيف (لتتكون مياه غنية بثاني أكسيد الكربون).
- 2- متكونات حجر جيري به عديد من الفواصل.
- 3- انحطار هيدروليكي مناسب يسمح بانسياب المياه الجوفية خلال الصخور القابلة للذوبان.

VII. الماء الموجود في أعماق القشرة الأرضية

تكون كل الصخور الموجودة تحت منسوب الماء الجوفي مشبعة بالماء . وكما ذكرنا سابقاً، فإن الجيولوجيين يجدون الماء في التكونات المنفذة الموجودة حتى في أعماق الآبار التي تُحفر للبحث عن البترول ، على أعماق تصل إلى حوالي 8 أو 9 كيلومتر من سطح الأرض . ويتحرك الماء عند هذه الأعماق ببطء ، ربما بمعدل أقل من ستيتمتر في العام . ولذلك فإنه يكون هناك متسع من الوقت لإذابة المعادن ، حتى تلك الشحيحة الذوبان منها ، أثناء تحلل الماء في الصخور . وتصبح المواد المذابة في تلك المياه أعلى تركيزاً من المياه

تكثر الكهوف والحفر الوعائية في المناطق التي تكون الصخور فيها قابلة للذوبان ، لدرجة أنها تكون مظاهر طوبوغرافية خاصة بها . وتتميز هذه الطوبوغرافية بوجود أحواض عديدة صغيرة ومتقاربة ونمط صرف ممزق ، كما تختفي المجارى المائية في هذه المناطق لتعود للظهور في أماكن أخرى على هيئة ينابيع كبيرة . وتسمى المنطقة المميّزة بهذه المعالم بطوبوغرافية الكارست karst topography نسبة إلى منطقة في الأجزاء الشمالية من يوغوسلافيا سابقاً ، والتي تتميز بطوبوغرافية غير منتظمة من التلال والعديد من الحفر البالوعية (شكل 19.13) . وعلى الرغم من أن طوبوغرافية الكارست تميز المناطق الكربوناتيّة، إلا أن الكارست يمكن أن يتكون أيضاً في مناطق تتكون من الجبس والملح . وعموماً، فإن الكارست يتكون أكثر ما يكون في المناطق التي تتميز بثلاث خصائص:



شكل (19.13): تتميز تضاريس الكارست بوجود كهوف تحت سطحية والكثير من الحفر البالوعية sinkholes السطحية . وقد يقطع نهر رئيس المنطقة ، ولكن تختفي الكثير من المجارى المائية الصغيرة في الحفر البالوعية .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlson, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

صخر جيري دقيق البلور أبيض أو كريمي اللون يستخدم أحيانا كصخر مصقول في أعمال البناء . وتكون المياه الحرمائية مسئولة عن ترسيب عديد من الحامات الفلزية في العالم عندما تهاجر هذه المحاليل في القشرة الأرضية ثم تبرد . والمصدر الأساسي لمعظم المياه الحرمائية في القارات هو المياه السطحية التي تخللت إلى المناطق العميقة من القشرة الأرضية . وقد تكون بعض المياه الجوفية قديمة جدا ، حيث مُدّر أن المياه المستمدة من الأمطار والجليد في هوت سبرنج بولاية أركانساس Hot springs Arkansas قد سقطت منذ أكثر من 400 سنة مضت ، وأنها تسربت ببطء إلى الأرض .

والمصدر الآخر للمياه الحرمائية هو الماء الهارب من الصحارة . ففي مناطق النشاط الناري تتسرب المياه الجوفية في الأرض وتقابل كتلا من الصخور الساخنة لتصبح ساخنة ثم تختلط بالماء المنطلق من الصحارة القريبة ، ثم يعود خليط الماء الحرمائي حثيثا إلى سطح الأرض على هيئة ينابيع حارة hot springs أو فوارات (جيزارات) geysers . فينبغي أن تنساب الينابيع الحارة باستمرار ، فإن الفوارات (الجيزارات) تخرج منها المياه الساخنة والبخار بصورة متقطعة .

والنظرة التي تشرح الخروج المتقطع للفوارات هي نموذج للاستنتاج الجيولوجي لديناميكية عمل الماء الجوفي الساخن ، والذي يوجد على بعد مئات الأمتار تحت سطح الأرض . ومن المحتمل أن الفوارات تكون متصلة بالسطح بنظام من الكسور غير المنتظمة والمنحنية ويتجاوب وفتحات ، عكس الينابيع الحارة التي تنبثق مباشرة وبنظام أكثر انتظاما إلى السطح . ويوضح شكل (20، 13) النظرية التي تشرح الخروج المتقطع للفوارات.

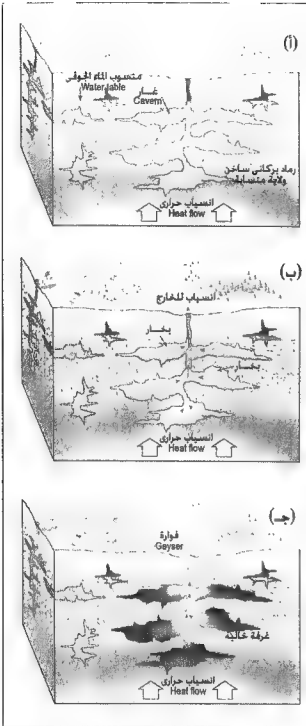
الموجودة قرب السطح ، مما يجعل المياه الموجودة عند الأعماق الكبيرة غير صالحة للشرب . فعل سبيل المثال ، فإن المياه الجوفية التي تتخلل طبقات الملح القابلة للسذيان بسرعة عميل لأن تصبح غنية بكلوريد الصوديوم بدرجة كبيرة .

وتوجد صخور القاعدة النارية والمتحولة عند أعماق أكبر تتراوح بين 12 إلى 15 كيلو متر تحت المكونات الرسوبية الموجودة في الجزء العلوي من القشرة الأرضية . وتقل المسامية والنفاذية بدرجة كبيرة في صخور القاعدة النارية والمتحولة ، وبالتالي تكون كمية الماء في تلك الصخور صغيرة للغاية .

أ. المياه الحرمائية

توجد الينابيع الحارة الطبيعية في يلوستون ناشيونال بارك Yellowstone National Park في شمال غرب الولايات المتحدة وفي أركانساس وريكجافيك Javik Reykjavik في آيسلندة ، وفي مناطق أخرى عديدة من العالم . وتهاجر المياه الحرمائية hydrothermal solutions (المياه الساخنة في القشرة الأرضية) في مثل هذه المناطق بسرعة لأعلى لتنبثق عند سطح الأرض دون أن تفقد الكثير من الحرارة ، وتصل أحيانا إلى درجة حرارة الغليان .

وتتحمل المياه الحرمائية بالمواد الكيميائية التي تُذاب من الصخور عند درجات الحرارة العالية . ويمكن أن تبقى المواد الذائبة في المحلول طالما بقيت المياه ساخنة . ولكن بمجرد أن تصل المياه الحرمائية إلى سطح الأرض فإنها تبرد بسرعة وترسب مختلف المعادن مثل الأوبال (أحد أشكال السيليكا) والكالسيت أو الأراجونيت (أشكال بلورية لكاربونات الكالسيوم) . كما تتكون قشرة من كربونات الكالسيوم عند بعض الينابيع الحارة والتي تكون صخر الترافرتين travertine ، وهو



شكل (20.13): شكل نموذجي لقنارة (جيزر) geyser، والتي تتكون في غرف تحت سطح الأرض عندما لا تتوزع الحرارة بتيارات الحمل.

أ. في هذا الشكل، ترتفع درجة حرارة المياه الجوفية الموجودة بالقرب من قاع الغرفة إلى درجة تقرب من درجة الغليان، حيث إن درجة الغليان عند قاع القنارة تكون أعلى منها عند السطح (أكثر من 100 درجة مئوية) لأن وزن الماء يزيد الضغط.

ب. يسخن أيضًا الماء الموجود لأعلى في نظام القنارة، ولهذا فهو يتمدد وينساب بعضه للخارج عند سطح الأرض، ويتسبب فقد الماء في خفض الضغط الموجود على الماء المتبقى في أسفل.

ج. يحدث الغليان في منطقة الضغط المنخفض بالقرب من القاع. ويتحول بعض ماء القاع إلى بخار، ويتمدد البخار ويدفع كفقرات. وبعد دوران الجيزر يفورس بعض الماء الجوفى البارد في الغرفة وتبدأ الدورة من جديد.

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An Introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

معدنية أخرى في الصخور الرسوبية بعيدا عن أى نشاط نارى .

كما استخدم الجيولوجيون المياه الحرارية كمصادر جديدة ونظيفة للطاقة ؛ حيث استخدام البخار الناتج عن النشاط الحرماىى فى الينابيع الحارة والفوارات (الجيزارات) فى كل من شمال كاليفورنيا وأيسلندة

وتنشأ بعض الينابيع الحارة الأخرى من الماء الجوى الذى تحرك لأسفل فى مكونات الصخور الرسوبية العميقة ، حيث ترتفع درجة حرارته نتيجة ارتفاع درجة الحرارة طبيعيا مع العمق نتيجة ضغط بخار الماء المتجمع ، ثم تعود على هيئة مياه حرماىية إلى السطح . وقد نشأ عديد من الحامات الفلزية ورواسب

والخصى والحجر الرمل المنفذه هي أكثر مكامن المياه الجوفية إنتاجا .

6- تقع الينابيع غالبا في المناطق التي يتقاطع فيها سطح الأرض مع منسوب الماء الجوفي أو حاسب للماء (صخر غير منفذ) .

7- بحسب معدل تصريف الماء الجوفي من ناتج مساحة المقطع العرضي لمسار الانسياب ومعامل النفاذية والانحدار الهيدروليكي طبقا لقانون دارسي.

8- إذا كانت قمة البئر التي تخترق مكامن ارتوازي تقع أسفل منسوب الماء الجوفي في منطقة إعادة الملء فإن الضغط الهيدروستاتيكي بسبب ارتفاع الماء في البئر وتدفعه طبيعيا عند السطح دون ضخ .

9- ينساب الماء الجوفي في معظم الآبار مباشرة تحت تأثير الجاذبية الأرضية . ويسبب ضخ الماء من الآبار في تكون مغاريط انخفاض في منسوب الماء الجوفي .

10- تتأثر نوعية (جودة) الماء بمحتواه من المواد المذابة طبيعيا وتتداخل ماء البحر والملوثات المختلفة الناشئة عن الانسياب والنشاط الصناعي ، والتي تتخلل خزانات المياه الجوفية .

11- تذيب المياه الجوفية المعادن من الصخور ، كما أنها ترسب مواد تعمل كمواد لاصقة بين حبيبات الرواسب ، وتقلل بذلك المسامية وتتحول الراسب إلى صخر رسوبي . كما تتكون الكهوف والحفر البالوعة نتيجة إذابة المياه الجوفية للصخور الكربوناتيّة ، كما ترسب كربونات الكالسيوم على هيئة صواعد وهوابط . وتنشأ

ويطاليا ونيوزيلنده لإدارة التوربينات المولدة للكهرباء . وعلى الرغم من أهمية المياه الجوفية في توليد الطاقة وفي احتوائها على الخامات المعدنية وفي الاستشفاء ، إلا أن هذه المياه لا تساهم في إمدادات المياه السطحية بسبب احتوائها على الكثير من المواد الذائبة . ويلاحظ أن صخور الأوليجوسين بمنطقة الجبل الأحمر والمناطق المحيطة به في شرق القاهرة تحتوى على الكثير من الفوارات (الجيزارات) المتحجرة .

الملخص

1- تنشأ المياه الجوفية أساسا من ماء المطر ، حيث يتواجد الماء في كل مكان تحت سطح الأرض . ويتحرك الماء أساسا بالتخلل وبمعدل أبطأ كثيرا من انسياب المياه السطحية في المجارى المائية فوق سطح الأرض ..

2- منسوب الماء الجوفي هو الحد الأعلى لنطاق التشبع وفي المناطق الرطبة قد يكون قريبا إلى حد كبير من سطح الأرض .

3- في المناطق الرطبة يكون منسوب الماء الجوفي مطابقا تقريبا لشكل سطح الأرض فوقه ، بينما ينخفض منسوب الماء الجوفي في الآبار الجافة في أوقات الجفاف .

4- يحدد منسوب الماء الجوفي السطح العلوى لمكامن ماء غير محصور ، بينما تحد حاسبات الماء (طبقات غير منفذة) الممكن المحصور من أعلى ومن أسفل .

5- مكامن المياه الجوفية هي تكوينات صخرية منفذة تحت سطح الأرض تحتوى ماء صالحا للاستخراج ، وتسمح بمرور الماء بكميات تكفى لإمداد الآبار . وتعتبر طبقات الجروول

13- يؤدي ارتفاع حرارة المياه الجوفية المتخللة في أجسام الصهارة داخل القشرة الأرضية إلى تحرك وانتقال المياه الحرارية لتخرج إلى سطح الأرض على هيئة فوارات (جيزارات) وينابيع حارة . وتكون الصخور عند الأعماق الكبيرة في القشرة الأرضية (أكثر من 12-15 كم) عالية الكثافة ومنخفضة المسامية ، ولذلك تحتوى على كميات ضئيلة للغاية من الماء .

طوبوغرافية الكارست في مناطق الكربونات المسامية أو الصخور الأخرى سهلة الذوبان ، والتي تتميز بتواجد الكهوف والحفر البالوعية مع اختفاء المجارى المائية .

12 - يجب تخزين النفايات الخطرة (السامة والمشتعة) تحت سطح الأرض بشرط أن تكون الظروف الجيولوجية تسمح بعدم تغير أنظمة المياه الجوفية على امتداد فترات زمنية جيولوجية طويلة .

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

<http://water.usgs.gov/><http://www.thehydrogeologist.com/index.htm><http://ohrc.msfc.nasa.gov/><http://www.epa.gov/ow/>

المصطلحات المهمة

aquiclude	حاجس الماء (طبقة كثيفة)	perched groundwater	ماء جوفي جائثم
aquifer	مكمن ماء جوفي	perched water table	منسوب ماء جائثم
artesian aquifer	مكمن ارتوازي	percolation	تخلل
artesian flow	انسياب ارتوازي	permeability	نفاذية
compactness	كس (دمج)	porosity	مسامية
cone of depression	مخروط الانخفاض	recharge	إعادة الملء
confined aquifer	مكمن ماء محصور	recharge area	منطقة إعادة الملء
Darcy's law	قانون دارسي	replacement	إحلال
discharge	تصريف	saturated zone	نطاق التشبع
dripstone	حجر التقيط = stalactite	sinkhole	حفرة بالوعة
effluent stream	مجرى مائي متأثر	spring	ينبوع
geyser	فؤارة (جيزر)	stalactite	هابط (ج. هوابط)
groundwater	ماء جوفي	stalagmite	صاعد (ج. صواعد)
groundwater table	منسوب الماء الجوفي	unconfined aquifer	مكمن ماء غير محصور
hot spring	ينبوع حار	unsaturated zone	نطاق غير مشبع
hydraulic gradient	تدرج هيدروليكي	water table	منسوب الماء الجوفي
influent stream	مجرى مائي مؤثر (نهر مغذ)	well	بئر
karst topography	طوبوغرافية الكارست	zone of aeration	نطاق التهوية
meteoric water	ماء جوي	zone of saturation	نطاق التشبع

الأسئلة

1. ما المصدر الأساسي للمياه الجوفية ؟
2. ما الفرق بين نطاقات الماء الجوفى المشبعة وغير المشبعة ؟
3. لماذا يبقى النطاق الرقيق الموجود فوق منسوب الماء الأرضى مباشرة فى حالة رطبة باستمرار ؟
4. لماذا تميل ممرات انسياب المياه الجوفية المتحركة تحت التل للتحرك لأعلى ناحية المجرى المائى فى واد مجاور ؟
5. ما المتغيرات التى تحدد الزمن الذى يستغرقه الماء للتحرك من منطقة إعادة الملء إلى منطقة التصريف ؟
6. اذكر ما الانحدار الهيدروليكي وما أهميته فى تحديد معدل انسياب الماء الجوفى.
7. ما ممكن الماء الجوفى ؟ ولماذا يكون الحجر الرملى مكمنا أرضيا أفضل من الطفلى أو حجر الصلصال ؟
8. ما الخصائص الموجودة فى الصخور النارية والمتحولة التى تسمح بانسياب المياه الجوفية فيها ؟
9. ما علاقة الينابيع بمستوى الماء الجوفى ؟ اذكر الفرق بين الينابيع الحارة والفسورات (الجزيرات) ؟
10. ما أسباب تكون مخروط انخفاض حول بئر منتج ؟
11. ما الأسباب التى تجعل الماء يرتفع إلى سطح الأرض أو فوقها فى البئر الارتوازية ؟
12. لماذا يكون الرمل مؤثرا بدرجة خاصة فى تنقية المياه المناسبة خلاله ؟
13. لماذا لا تتكون الصواعد والهوابط فى كهف موجود فى نطاق التشيع ويكون بالتالى مملوءا بالكامل بالماء ؟
14. لماذا لا تتكون طوبوغرافية الكارست بصورة ملحوظة فى الحجر الجيري فى المناطق الشديدة البرودة ؟
15. اقترحت منطقة كبيرة على جانب تل لاستخدامها كمردم برى للنفايات المتخلفة عن مدينة صغيرة قرية ، واشتشرت لعمل تقييم جيولوجى للموقع فى مدى تأثر مصادر الماء الجوفى المحلية بهذه النفايات . ما العوامل الجيولوجية التى سيتم وضعها فى الاعتبار عند الفحص ، ولماذا ؟
16. إذا كنت تعيش بالقرب من الشاطئ ، وبدأت تلاحظ أن هناك طعما ملحا خفيفا فى ماء البئر ، كيف يمكنك أن تشرح التغير فى نوعية الماء ؟

أ. تحول الثلج إلى جليد المتلجة: الجليد باعتباره صخرا

أ. أنواع المثاليج

1. المثاليج الجبلية والقلنسوات الجليدية

2. المثاليج القارية والرفوف الجليدية

ب. كيفية تكون المثاليج

جـ. نمو المثاليج: التراكم

د. انكماش المثاليج : النفاذ

هـ. تغيير حجم المثاليج : العلاقة بين التراكم والنفاذ

و. المثاليج : مصادر متحركة للماء في المناطق الفقيرة به

II. حركة المثاليج

أ. ميكانيكية الانسياب الجليدي

III. التلج ومعالـم الأرض الجليدية

أ. التجويه الجليدية ومعالـم التعرية

1. معالـم التجويه الجليدية الصغيرة

2. المعالـم الأرضية للجبال المتثلجة

3. المعالـم الجليدية الناشئة عن المثاليج القارية

والقلنسوات الجليدية

ب. نقل الرواسب بالمثاليج

ج. الرواسب الجليدية

1. الرواسب المتكونة بالجليد

2. الرواسب المتكونة بالماء : المتجرفات المتطبقة

3. تربة الصقيع الدائم

IV. العصور الجليدية : تثلج البليستوسين

أ. مثالج العصر الجليدى

ب. تحولات المجارى المائية والبحيرات الجليدية

ج. انخفاض مستوى سطح البحر

د. تشوه القشرة الأرضية

هـ. التلججات المبكرة

1. الدليل من قاع البحر

2. التلججات قبل حين البليستوسين

V. أسباب حدوث العصور الجليدية

أ. العصور الجليدية وتغير وضع القارات

ب. العصور الجليدية والنظرية الفلكية

ج. تركيب الغلاف الجوى

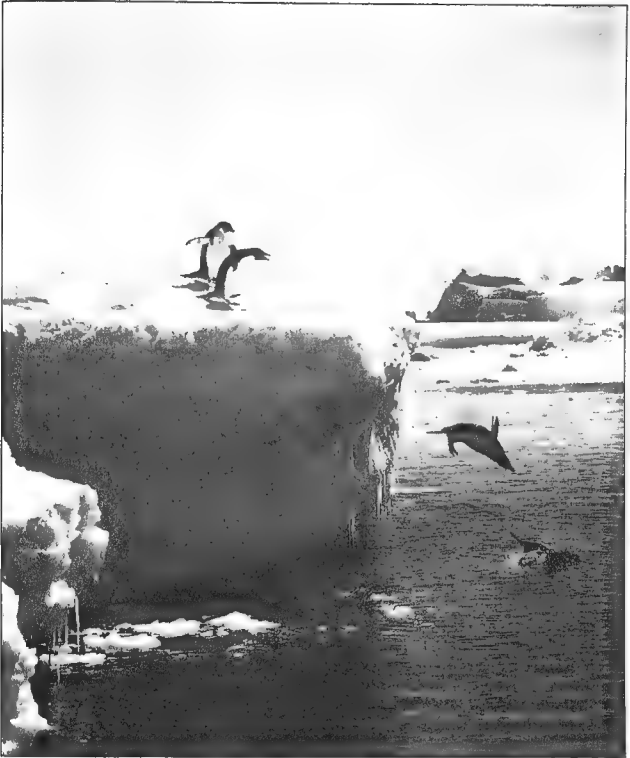
د. التغيرات فى دوران المحيطات

والجليد هو العامل الجيولوجي المهم في تشكيل سطح الأرض في مناطق الأرض المتجمدة ، وينطى جليد المثلج حوالي 10% من سطح الكرة الأرضية . ويتحرك الكثير من هذا الجليد ببطء واستمرار من مراكز مسطحات جليد شاسعة إلى حوافها . كما ينحدر الجليد ببطء أيضا من قمم الجبال ، وينصهر خلال فترة زمنية قصيرة عند حواف المثلج ، ولكن بمعدل تقدمه نفسه ، ولذلك تبقى مساحة الجليد الكلية ثابتة تقريبا .

ويتسبب المناخ البارد في اتساع المثلج على المدى الزمنى الطويل ، حين يزيد معدل تراكم الجليد عن معدل انصهاره . وقد غطى الجليد منذ حوالى عشرين ألف سنة مضت ثلاثة أضعاف المساحة المغطاة به الآن . ومن المحتمل أن الجليد قد انكمش بدرجة ملحوظة على الأرض خلال القرون القليلة الماضية ، حيث كان معدل انصهار الجليد نتيجة ارتفاع درجة حرارة الأرض أسرع من معدل تراكمه وتحركه . ومن المؤكد أيضا أن تأثير انصهار الجليد على الأرض يكون ضخماً ، حيث يؤدي هذا الانصهار إلى ارتفاع مستوى سطح البحر ليغطي المدن الساحلية منخفضة الارتفاع ، بالإضافة إلى هجرة نطاقات المناخ ، حيث تغير نطاقات المناخ المعتدل إلى نطاقات شبه قاحلة . ومن المؤكد أن معرفة المناطق الجليدية هو موضوع تطبيقي ومهم في فهم البيئة .

تُظهر صورة الأرض من الفضاء حجم الماء الذى يغطى كوكب الأرض ، كما تُظهر صور الأقمار الصناعية للمناطق القطبية وسلاسل الجبال ذات القمم البيضاء أن الكثير من ماء الأرض متجمد . فعندما يتساقط الثلج snow فوق سطح الأرض في فصول الشتاء المتعاقبة ، وبمعدل أكبر من معدل انصهار الثلج في فصول الصيف التالية ، فإن الثلج يبدأ في التراكم تدريجياً . ويزيد وزن الثلج بتراكم المزيد منه فوق الطبقات التى تسفله ، مما يؤدي إلى إعادة تبلور الثلج وتكون كتلة صلبة من الجليد ice . وتشبه تلك العملية تحول الصخور الرسوبية إلى صخور متحولة نتيجة إعادة التبلور تحت ضغط الرواسب المتراكمة . وعندما يزيد سمك الثلج والجليد المتراكمان تعمل قوة الجاذبية الأرضية على تحريك الكتلة المتجمدة وتشأ مثلجة (شكل 1.14) . ويمكن تعريف الثلجة glacier بأنها جسم ضخم دائم من الجليد على سطح الأرض ، يتكون أساساً من الثلج المتبلور ، والذي تشير الدلائل إلى أنه يتحرك حالياً أو تحرك يوماً ما في اتجاه المنحدرات أو لخارج مركز الثلجة نتيجة للجاذبية الأرضية .

وتغطي المثلج المناطق التى يكون متوسط درجة الحرارة فيها منخفضاً لدرجة أن الماء يبقى متجمداً طول العام . وتوجد معظم المثلج عند خطوط العرض العليا بالقرب من القطبين ، وهى أبرد أجزاء كوكب الأرض . كما توجد بعض المثلج الصغيرة عند خطوط العرض المتوسطة والمنخفضة على قمم الجبال العالية ، حيث توجد درجات الحرارة المنخفضة أيضاً .



شكل (1.14): جبل جليدي iceberg ومثلجة glacier في قارة أنتاركتيكا (القارة القطبية الجنوبية).

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

والقديمات مناطق تعتبر الآن أدغالا قارية ، بينما هناك أجزاء من الكرة الأرضية مغطاة حاليا بالجليد ، إلا أنها كانت دافئة ورطبة فقط ولم يكن بها قطنسوات جليدية قطبية في الماضي . ويستخدم التوزيع السابق للمثلج في تحديد نوع المناخ في الماضي ، وأيضا في التنبؤ بالتغيرات المستقبلية في المناخ أيضا .

ومستعرض في هذا الفصل أنواع المثلج وكيفية تكونها وطرق تحركها . كما مستعرض أيضا التجوية الجليدية ومعالم التعرية ، وكذلك تأثير المثلج أثناء نقل وترسيب حولتها من الرواسب ، تاركة وراءها عديداً من المعالم على سطح الأرض نتيجة حركة وتقدم المثلج وتراجعها . كما مستعرض العصور الجليدية وأسباب حدوثها .

1. تحول الثلج إلى جليد الثلجة : الجليد باعتباره صخرا

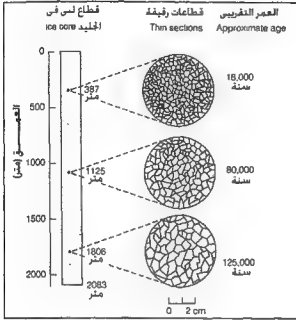
يعتبر جليد الثلجة صخرا متحولا ، يتكون من بلورات متداخلة من معدن الجليد ice . وتعتمد خصائص الجليد على عوامل التشوه تحت الضغط الناشئ عن تراكم الثلج والجليد الذي يعلوه . وحيث أن الثلج snow المتساقط حديثاً يكون على المسامية ، كما تكون كثافته أقل من عشر كثافة الماء العادي ، فإن الهواء يتخلل المسام بين بلورات الثلج بسهولة ، حيث تختفي تدريجياً نقاط الضعف الموجودة في رقائق الثلج بالبخر . ويتكثف بخار الماء الناتج ، خاصة في الأماكن القريبة من مراكز رقائق الثلج ، وتصبح بلورات الجليد الهشة والمتحولة ببطء أصغر حجماً ، وأكثر استدارة وكثافة كما تختفي المسام بينها وتضمحل فقاعات الهواء بداخلها (شكل 2.14).

وتقوم المثلج بتعرية الوديان ذات الجوانب شديدة الانحدار وكشط أسطح صخور الأساس واقتلاع كتل ضخمة من الأرض الصخرية أسفلها . وخلال العصور الجليدية ice ages الحديثة استطاعت المثلج تعرية سطح الأرض بمعدل أكبر بكثير مما فعلت الأنهار والرياح خلال هذا الزمن الجيولوجي القصير نسبياً . ويبلغ ركاز التجوية الجليدية حجماً هائلاً ، حيث ينقل الجليد أطناناً هائلة من الرواسب إلى حافة الثلجة ، أو لتترسب بعيداً بواسطة مجارى الماء المنصهر . وتؤثر التعرية الجليدية والترسيب على الأرض من النواحي التالية :

1. تصريف الماء وهجرة الرواسب في الأنهار الرئيسية .
2. كمية الراسب المنقولة إلى المحيطات .
3. التعرية والترسيب في المناطق الساحلية وعلى الرفوف القارية الضحلة نتيجة التغير في مستوى سطح البحر .

وقد نحتت المثلج الكثير من معالم الأرض في أحزمة الجبال ، كما شكلت في البليستوسين معالم مناطق شاسعة من أراضي قارية منخفضة امتدت بعيداً فيما نعتبره الآن مناطق معتدلة . وعند انصهار تلك المثلج فإنها خلفت وراءها رواسب وأشكال تعرية تدل على سابق وجودها .

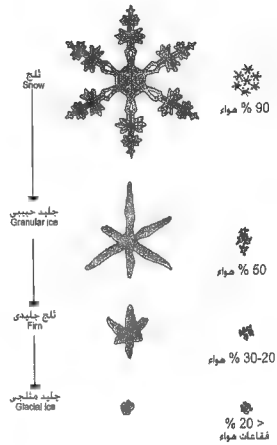
وتدل الرواسب الجليدية وأشكال التعرية الجليدية على المناخات القديمة والحديثة ، لأن الثلج والبرودة المستمرة ضروريان لتكون المثلج . ويدل الانتشار الواسع للمثلج في الماضي القريب على أن مناخ الأرض كان أبرد كثيراً مما هو عليه الآن في مناطق كثيرة . ومن المعروف الآن أن المثلج غطت في الأزمنة الجيولوجية



شكل (3.14): عينة أسطوانية حُفرت في القريشة الجليدية ice sheet في محطة فوستوك في شرق قارة أنتاركتيكا. وتوضح القطاعات الرقيقة التي أخذت في الجليد على أعماق مختلفة زيادة حجم بلورات الجليد باطراد بسبب إعادة التبلور ببطء، نتيجة لزيادة وزن السطح فوقها.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

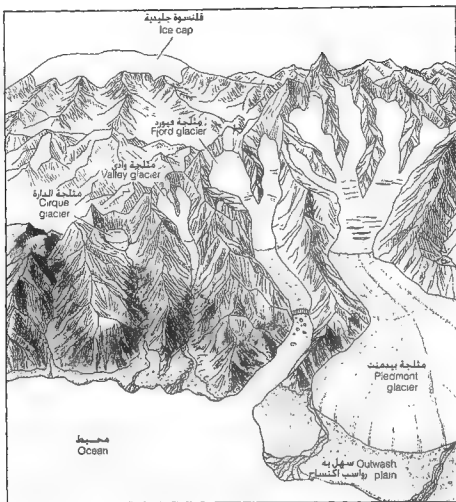
وتحدث المزيد من التغيرات في الجليد كلما زاد عمق الثلجة. ويوضح شكل (3.14) عينة أسطوانية حصل عليها العلماء الروس عندما حفروا تحت قاعدة ثلجة في مركز فوستوك Vostok Station في شرق قارة أنتاركتيكا (شكل 4.14). حيث لاحظوا أن زيادة سمك الثلجة بإضافة المزيد من الثلج المتساقط يعمل على زيادة الضغط، الذي يؤدي إلى نمو حبيبات الجليد الصغيرة وزيادة حجمها حتى يصل قطرها بالقرب من قاعدة الثلجة إلى 1 سم أو أكثر. وتشبه الزيادة في حجم الحبيبات نتيجة زيادة الضغط ما يحدث عندما يتحرك صخر دقيق الحبيبات إلى الأعماق داخل قشرة الأرض لتعرض لضغط عال لمدة طويلة، حيث تتكون ببطء حبيبات كبيرة من المعادن المختلفة (انظر فصل الصخور المتحولة).



شكل (2.14): مراحل تحول بلورات الثلج إلى جليد حبيبي ثم إلى ثلج جليدي وأخيرا إلى جليد ممتلئ. ويصاحب هذا التحول زيادة في الكثافة، حيث يقل الهواء في البلورات وتختفى المسام بينها، كما تختفي النقاط الدقيقة لرفاق الثلج نتيجة الانصهار والتبخير.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ويؤدي التراكم إلى تزايد كثافة الثلج عاما بعد عام إلى أن يصبح في النهاية غير منفذ للهواء، ويصبح جليد ممتلئ. وعلى الرغم من أن الجليد يصبح صخرا، إلا أن هذا الجليد يكون له درجة انصهار أقل بكثير من درجة انصهار أى صخر آخر يتواجد في الطبيعة، وتكون كثافته في حدود 0.9 جم / سم³، مما يعنى أنه سيطفو فوق سطح الماء.



شكل (4.14): الأنواع الشائعة من مثلج الجبال مصنفة حسب الشكل والحجم .

توجد مثلجة دائرة cirque glacier صغيرة في حفرة عميقة مستديرة عند قمة الوادي بينما تندمج دارتان جليديتان معاً في الوادي المجاور وتكون مثلجة الوادي valley glacier ، كما تكونت مثلجة فيورد fjord glacier في واد مجاور ، حيث انفصلت جبال جليدية icebergs في فيورد طويل ، وتكون مثلجة بيدمنت piedmont glacier عندما تتلقى عدة روافد جليدية في مجرى جليدي واحد ينتهي بفريسة جليدية واسعة . ونلاحظ في أعلى الجبل وجود قلنسوة جليدية ice cap على شكل قبة تغطي هضبة في المنطقة .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

والثاني هو المثلج القارية والرفوف القارية . كما تصنف

أ. أنواع المثلج

المثلج أيضاً بناءً على درجة حرارتها الداخلية .

ويوضح جدول (1.14) أنواع المثلج الرئيسية .

ونعرض فيما يلي وصفا لتلك الأنواع .

تقسم المثلج بناءً على الحجم والشكل إلى قسمين

رئيسيين هما المثلج الجبلية والقلنسوات الجليدية

جدول (14.1) الأنواع الرئيسية للمثلجات مصنفة طبقاً لشكلها

نوع المثلجة	الوصف
مثلجة الوادى Valley glacier	تتساق وتنتشر من جانب الوادى على امتداد وفوق قاع الوادى
مثلجة بيدمنت Piedmont glacier	فص عريض من الجليد يشبه الملعقة المقلوبة ، يمتد فوق منحدرات لطيفة واسعة (بيدمنت) إلى ما بعد مقدمة الجبل ، حيث تمتد بالجليد مثلجة وادى كبيرة أو أكثر .
مثلجة الدارة Cirque glacier	توجد في حفرة دائرية عميقة على جانب من الجبل
مثلجة فيورد Fjord glacier	مثلجة وادى توجد في فيورد ، حيث يكون قاع الفيورد أسفل مستوى منسوب البحر .
قلنسوة جليدية Ice cap	جسم من الجليد والثلج على شكل قبة ، يغطي الأراضي المرتفعة من الجبال (أو الأراضي الأقل ارتفاعاً ولكن عند خطوط عرض عالية) . وتظهر القلنسوة الجليدية انسياباً إشعاعياً للخارج .
مثلجة قارية Continental glacier	كتلة من الجليد في حجم القارة تغطي الأرض وتكون سمكية ، وتعرف أحياناً بالفريشة الجليدية ice sheet .
رف قارى Ice shelf	مثلجة سمكية على هيئة لوح تطفو فوق البحر ويتم تغذيتها بواحدة أو أكثر من المثلجات فوق سطح اليابس ، توجد عادة في الخليجان الكبيرة .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

1. مثلجات الوادى

تكون مثلجات الوادى valley glacier مألوفة لدى المتزلجين على الجليد ومتسلقي الجبال ، ويطلق عليها أحياناً المثلجات الألبية alpine glaciers. وتتكون تلك المثلجات من أنهار من الجليد تجري من المرتفعات الموجودة بالمناطق الباردة ، حيث يتراكم الثلج غالباً عند تلك المرتفعات ، في أودية موجودة سلفاً وينساب بين حوائط الوادى (شكل 14.4). وتشغل معظم هذه المثلجات عرض الوادى بأكمله ، وقد يصل سمك الجليد فيها مئات الأمتار . وعند خطوط العرض المنخفضة يكون المناخ أكثر دفئاً ، لذا توجد مثلجات الوادى عند رؤوس الأودية فقط ، في قمم الجبال ، أما عند خطوط العرض العليا حيث تكون المناخات أكثر برودة ، فإن المثلجات الجبلية تهبط على امتداد الوادى لمسافة يبلغ طولها عدة كيلومترات . كما قد تمتد على هيئة فصوص عريضة في الأراضي المنخفضة المتاخمة لسفوح الجبال . وعندما

تتحد مثلجات الوادى على سلاسل جبلية شاطئية فإنها قد تنتهى عند حافة المحيط حيث تتكسر كتل من الجليد وتكون جبال الجليد icebergs . وقد تمتد مثلجة جبلية كبيرة جداً للخارج على بيدمنت (سفح جبل) لطيف الانحدار وإلى ما بعد قاعدة الجبل ، وتعرف تلك المثلجة بمثلجة بيدمنت piedmont glacier ، وتتكون من فص كبير وعريض من الجليد يشبه الملعقة المقلوبة (شكل 14.4). ويؤدي اقتلاع وتمزق الصخور عند قمة مثلجة الوادى بفعل الجليد إلى نحت حفرة مستديرة عميقة تتحدّر جوانبها برفق ، تعرف بدارة الجليد cirque ، وهى تشبه السلطانية ، أو تشبه نصف فنجان شأى قُطع رأسياً (شكل 14.4).

الفيوردات: وقد تقوم مثلجات الوادى عند الشواطئ، وعلى عكس الأنهار أو المجرى المائية عموماً ، بتعرية قيعان الوادى إلى مستوى أعمق بكثير من مستوى سطح البحر . وعندما يراجع الجليد ، فإن هذه الأودية

الجليد عند الشاطئ الذي تحيطه الجبال إلى الأسمه ضيقة تشبه مئالغ الوادى ، وتنحدر عبر الجبال حتى تصل إلى البحر . ويتكسر الجليد عند البحر ليكون جبال الجليد التى تطفو فى البحر بحرية .

ويغطى قارة أنتاركتيكا فريشتان جليديتان كبيرتان تتقابلان على امتداد سلسلة جبال شاهقة الارتفاع تعرف بجبال ترانس أنتاركتيك Transantarctic Mountains . وتضم قارة أنتاركتيكا حوالى 84 ٪ من جليد العالم ، ويبلغ حجم الجليد بها حوالى 24 مليون كم³ . وتغطى الفريشة الجليدية الأكبر قارة أنتاركتيكا ، بينما تغطى الفريشة الأصغر عدة جزر تقع فى غرب القارة ، ويطلق عليها أرخبيل أنتاركتيكا Antarctic archipelago . وبسبب الفريشة الجليدية فإن قارة أنتاركتيكا يكون بها أعلى متوسط ارتفاع فوق سطح الأرض وأقل متوسط درجة حرارة بالنسبة لكل القارات (شكل 5.14) .

والرف الجليدى ice shelf هو غطاء سميك من الجليد مستوي تقريباً يطفو فوق سطح المحيط وتتم تغذيته بوحدة أو أكثر من المئالغ فوق سطح اليابسة . ويتهى من ناحية البحر بجرف جليدى حاد قد يرتفع إلى حوالى 50 متراً . وتوجد الرفوف الجليدية عند عدة أماكن على امتداد حواف فرش أنتاركتيكا الجليدية . فمثلاً يطفو فوق بحر روس Ross Sea رف جليدى يبلغ مساحة ولاية تكساس بالولايات المتحدة الأمريكية (شكل 5.14) .

المئالغ معتدلة الحرارة والمئالغ القطبية

تصنف المئالغ ليس فقط تبعاً للحجم والشكل ، ولكن أيضاً تبعاً لدرجة حرارتها الداخلية إلى مئالغ معتدلة الحرارة ومئالغ قطبية . فدرجة الحرارة مقياس مهم فى التصنيف ، لأنها تساعد فى تحديد كيفية تحرك المئالغ وكيف تساهم فى تشكيل سطح الأرض .

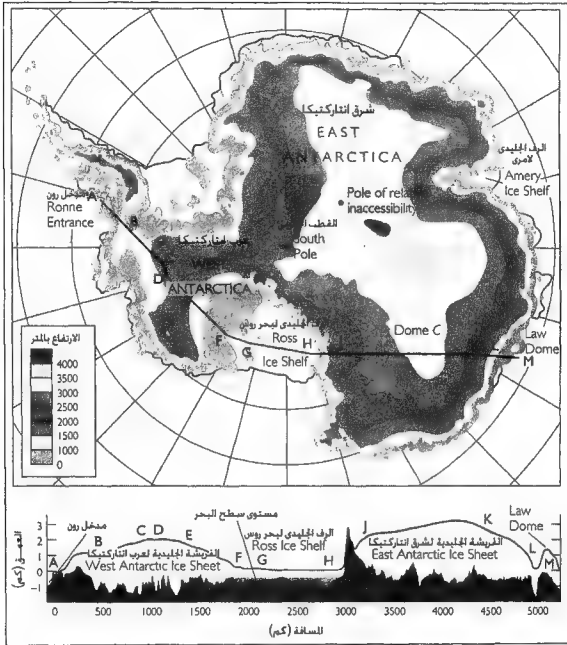
ذات الحوائط شديدة الانحدار والتى ما تزال تحتفظ ببروفيل على شكل حرف U تغمرها مياه البحر ، تسمى بالفيوردات fjords . وتسمى المئالجة التى تنشأ داخل الفيورد بمئالجة الفيورد fjord glacial ، شكل (4.14) . وتنشأ عن هذه الفيوردات مناظر مذهشة تميز شواطئ آلاسكا وكولومبيا البريطانية والنرويج ، وتعتبر مناطق مناسبة لرسم السفن وإنشاء الموانئ .

وتتكون القلنسوة الجليدية ice cap من جسم من الجليد والتلج على شكل قبة تظهر انسياباً شعاعياً للخارج ، وتغطى مناطق جبلية مرتفعة أو أرضاً منخفضة بالقرب من المناطق القطبية عند خطوط العرض العليا (شكل 4.14) .

2. المئالغ القارية والرفوف الجليدية

المئالجة القارية continental glacier هى أكبر أنواع المئالغ على سطح الأرض . والمئالجة القارية عبارة عن فريشة سميكة من الجليد تتحرك حركة بطيئة للغاية (لذلك تسمى أحياناً فريشة جليدية ice sheet) . وأكبر الفرش الجليدية فى العالم اليوم هى تلك التى تغطى معظم جرينلاند وقارة أنتاركتيكا (وهى قارة غير مأهولة تقع حول القطب الجنوبي) . ويغطى جليد المئالغ فى جرينلاند وأنتاركتيكا المنطقة بالكامل وليس وديان الجبال فقط .

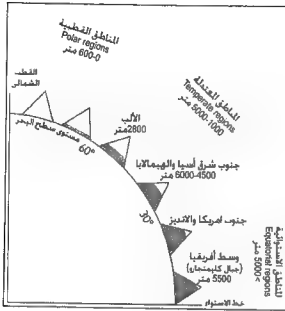
ويغطى الجليد حوالى 80 ٪ من المساحة الكلية لجزيرة جرينلاند التى تبلغ حوالى 4.5 مليون كيلو متر مربع ، يغطىها حوالى 2.8 مليون كيلو متر مكعب من الجليد ، تمثل حوالى 11 ٪ من جليد العالم . ويشبه السطح العلوى لفريشة الجليد عدسة محدبة ضخمة . ويبلغ سمك الجليد فى أعلى نقطة فى منتصف الجزيرة أكثر من 3200 متر . وينحدر سطح الجليد من المنطقة المركزية تجاه البحر من كل الجهات . وتتكسر فريشة



شكل (5.14): خريطة كتوتورية ومقطع عرضي في قارة أنتاركتيكا، توضح طوبوغرافية الغريشتين الجليديتين القاريتين اللتان تغطيان القارة القطبية الجنوبية كلها واليابسة تحتهما، كما توضح الخريطة الارتفاعات القارية (غير مهشمة).
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

عند ضغط معين . ويوجد الماء الناتج من عملية الانصهار مع الثلج في حالة اتزان في هذه المشالجات التي تتواجد أساسا عند خطوط العرض المنخفضة والمتوسطة (حول خط الاستواء) .

ويكون الجليد في الثلجة معتدلة الحرارة **temperate glacier** (تسمى أيضا مثلجة دافئة **warm glacier**) عند نقطة الانصهار الضغطي **pressure melting point** ، وهي درجة الحرارة التي ينصهر عندها الجليد



شكل (6.14): يتغير ارتفاع خط الثلج snow line ، وهو الارتفاع الذي لا ينصهر تماماً ما يسقط فوقه من ثلج في فصل الصيف . ويتغير هذا الارتفاع مع خط العرض ، حيث يكون عند مستوى سطح البحر أو بالقرب منه في المناطق القطبية ، بينما يصل إلى ارتفاع أكثر من 5500 متر عند خط الاستواء .
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

السفلى لثلج دائم طول العام . وتتكون المثلج حتى في المناخات الدافئة إذا كانت الجبال مرتفعة بدرجة كافية . وتتكون المثلج بالقرب من خط الاستواء على قمم الجبال التي يزيد ارتفاعها عن حوالي 5500 م . ويقل هذا الحد الأدنى من الارتفاع بانتظام ناحية القطبين ، حيث يبقى الثلج والجليد طوال العام حتى عند مستوى سطح البحر (شكل 6.14).

2 - كميات كافية من الثلج: يتطلب تكون الثلج والمثلج بالإضافة إلى البرودة الشديدة ، وجود بخار ماء كثيف في الهواء الجوى . وحيث إن معظم الرياح المحملة ببخار الماء تسقط معظم حولتها من

وعند خطوط العرض العليا والارتفاعات العالية ، حيث يكون المتوسط السنوي لدرجات حرارة الهواء تحت درجة التجمد ، فإن درجة حرارة المثلجة تبقى تحت نقطة الانصهار الضغطي حيث لا يحدث أى انصهار موسمي ، أو يحدث بدرجة محدودة . وتسمى المثلجة التي يبقى فيها الجليد تحت نقطة الانصهار الضغطي بالمثلجة القطبية polar glacier .

ب - كيفية تكوّن المثلج

يبدأ تكوّن المثلجة عندما يتساقط الثلج بغزارة في فصل الشتاء ، ولا ينصهر في فصل الصيف . ويتحول الثلج تدريجياً إلى جليد ، وعندما يزيد سمك الجليد بدرجة كبيرة ، فإنه يبدأ في التحرك . ويتطلب تكوّن المثلجة تحقق الشروط التالية :

1- درجات حرارة منخفضة: يلزم لتكوّن المثلجة أن تكون درجة الحرارة منخفضة بدرجة تكفى لأن يبقى الثلج مغطياً لسطح الأرض طول العام ، وتوجد هذه الظروف عند خطوط العرض العليا (المناطق القطبية وتحت القطبية) والمرتفعات العالية (الجبال). ويرجع السبب في ذلك إلى أن هذه المناطق تكون شديدة البرودة لأن الزاوية بين أشعة الشمس وسطح الأرض تزداد كلما اقتربنا من القطبين ، بمعنى زيادة زاوية سقوط الأشعة على سطح الأرض ، فكلما زادت هذه الزاوية قلت كمية الطاقة الإشعاعية للشمس التي تستقبلها المنطقة . أما المرتفعات العالية فتكون باردة لأن العشر كيلومترات السفلى من الغلاف الجوى تزداد برودتها بانتظام كلما ازداد الارتفاع فوق سطح الأرض . ونتيجة لذلك يتغير ارتفاع خط الثلج من موضع لآخر . ويعرف خط الثلج snow line بأنه الارتفاع الذي لا ينصهر ما يسقط فوقه من ثلج في فصل الصيف ، أى الحد

بين الدولتين . كما وجدت في شمال سيبيريا حيوانات منقرضة متجمدة ومحفوطة بالجليد القديم مثل الماموث، وهو حيوان ضخم يشبه الفيل نشأ قبل التاريخ وانتشر في المناطق الجليدية . كما وجد أيضاً في جليد المشالج أدلة مهمة على مناخ الأرض ، فقد أوضحت التحاليل الكيميائية لفقاعات الهواء في الجليد القديم جداً والمذفون في الأعماق في كل من جرينلاند وأنتاركتيكا ، أن مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي كانت أقل خلال الثلج الأخير عنها في أثناء تراجع الجليد .

د. انكماش المثالج: النفاد

يكتمل نمو الثلجة عندما يتراكم الجليد بسمك كاف ويبدأ في التحرك . وينساب الجليد مثل الماء على المنحدرات تحت تأثير الجاذبية الأرضية . فقد يتحرك الجليد لأسفل على امتداد واد في الجبل أو من مركز فريشه الجليد القارية . وتؤدي كلتا الحالتين إلى تحرك الثلجة إلى ارتفاعات أقل حيث تكون درجات الحرارة أعلى ، وتسمى كل كمية الجليد أو الثلج التي تفقدتها الثلجة كل عام بالنفاد (التلاشي) **ablation** . ويتحكم في عملية فقد الجليد أربع عوامل هي:

1. الانصهار **melting** ، حيث تفقد الثلجة مادتها عندما يبدأ الجليد في الانصهار .
2. الانفصال الجليدي **calving** ، حيث تتحرك الثلجة وتصل إلى الشاطئ ، فتفصل أجزاء من الجليد من مقدمة الثلجة وتتكرر وتكون جبالاً جليدية **icebergs** .
3. التسامي **sublimation** ، حيث يتحول الجليد مباشرة من الحالة الصلبة إلى الحالة الغازية في المناخات الباردة .
4. التعرية بالرياح ، حيث تسبب الرياح القوية تعرية الجليد بالانصهار والتسامي .

الثلج على الجانب المواجه للمريح من سلسلة الجبال العالية ، فإن الجانب المداير للمريح يكون جافاً ولا يتساقط عليه الثلج . فجيال الأنديز العالية تقع في حزام تب على رباح من الغرب . ولذلك تتكون المثالج على المنحدرات الغربية الرطبة ، بينما يكون الجانب الشرقي جافاً ، ويوجد عليه القليل من الثلج والجليد .

ج. نمو المثالج: التراكم

يشبه الثلج المتساقط حديثاً كتلة من الزغب أو القطن المندوف تتكون من رقائق الثلج **snow flakes** . ومع تقدم عمر بلورات الثلج الدقيقة تأخذ في الانكماش ، وتصبح متساوية الأبعاد (شكل 2.14) . وتتضاغط دقائق الثلج أثناء هذا التحول وتكون ثلجاً حبيباً أكثر كثافة . وعندما يتساقط ثلج جديد فإنه يدفن الثلج الأقدم تحته ، ويتضاغط هذا الثلج الحبيبي إلى شكل متساوي الأبعاد وأكثر كثافة يسمى ثلجاً جليدياً **firm** ، وهو مرحلة انتقالية بين الثلج **snow** والجليد **ice** . وتؤدي زيادة عمر الثلج ودفنه إلى تكوين جليد مثلجة صلب ، بسبب إعادة تبلور الحبيبات الأصغر مما يؤدي إلى تلاحم كل الحبيبات مع بعضها البعض . ويمكن اعتبار الثلج راسب يتحول بالدفن إلى صخر متحول هو الجليد . وتستغرق عملية التحول هذه عدة سنوات فقط ، وقد تستغرق من 10 إلى 20 سنة .

وتنمو الثلجة ببطء في فصل الشتاء ، نتيجة تساقط الثلج على سطح الثلجة وتحوله إلى جليد . وتسمى كمية الثلج التي تضاف إلى الثلجة سنوياً بالتراكم **accumulation** . وأثناء تراكم جليد الثلجة ، فإنه يحتفظ ببقايا حياة قديمة ؛ حيث أعلن علماء من إيطاليا والنمسا عام 1992م عن اكتشاف جثمان لإنسان ما قبل التاريخ محفوفاً في ثلوج جبال الألب على الحدود

جليدى calving لجليل جليدى طوله حوالى 80 كم (شكل 5.14). وقد نشأ هذا الانكماش من تدفئة الجانب الغربى لقارة أنتاركتيكا بحوالى 2.5 درجة مئوية خلال الخمسين عاماً الماضية . وتسبب التدفئة على مستوى الكرة الأرضية قلق العلماء الآن لأنها قد تؤدى إلى انفصال جليدى كبير لجبال جليدية ، مما يؤثر بالتالى على ارتفاع كبير فى مستوى سطح البحر .

و. المثلج : مصادر متحركة للماء فى المناطق الفقيرة به

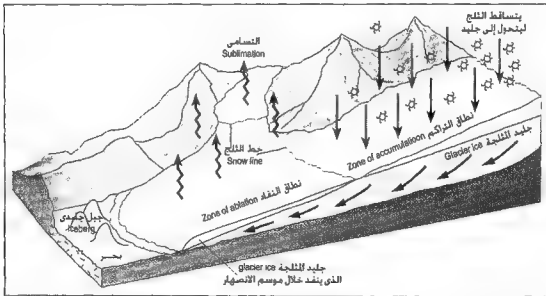
تنساب كميات كبيرة من الماء المنصهر من أسفل الجليد ومن جوانبه عندما تنصهر الثلجة . وهذه المياه المنصهرة هى مصادر أساسية لمجارى الماء الباردة التى تنساب فى وديان الجبال أسفل المثلج . فإذا أقيم سد من ركام الثلجة فى مثل هذه الوديان ، فقد تتكون بحيرات عند نهاية الثلجة .

ويعتبر الماء العذب المنصهر من المثلج مصدراً للماء العذب فى المناطق الفقيرة بالماء، شريطة أن يكون نقله إلى المستخدمين اقتصادياً . وعلى الرغم من أن هذا الاقتراح قد يكون غير عملي الآن ، إلا أنه قد يؤخذ فى الاعتبار فى المستقبل .

وتتكشف المثلج نتيجة تدفئة وانصهار الجليد عند حافة الثلجة المتقدمة . وهكذا ، وعلى الرغم من أن الثلجة تتقدم للخارج أو لأسفل على المنحدرات ، فإن الحافة الجليدية يمكن أن تتراجع بالانصهار والانفصال الجليدى .

هـ. تغير حجم المثلج : العلاقة بين التراكم والنفاذ

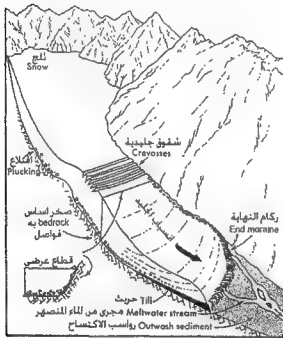
يؤدى الفرق بين التراكم والنفاذ إلى التنبؤ بحدوث نمو أو انكماش فى الثلجة (شكل 7.14) ، حيث تنمو بعض المثلج بينما يتكماش البعض الآخر ، ويحدث ذلك استجابة للتغيرات المناخية على امتداد عدة عقود . وعلى امتداد آلاف السنين السابقة بقيت العديد من المثلج ثابتة ، ويتم كثير من العلماء الآن بتأثير تدفئة الكرة الأرضية على مناخها . لذلك اقترح الجيولوجيون ضرورة ملاحظة العلاقة بين التراكم والنفاذ باستمرار . فانكماش المثلج فى مناطق معينة يمكن أن يكون تحذيراً مبكراً جداً لتغير محلى أو إقليمى فى المناخ . ففى عام 1995م أظهرت صور الأقمار الصناعية تراجعاً واسعاً للرف الجليدى الممتد فى غرب أنتاركتيكا ، وانفصال



شكل (7.14): متلجة وادى كبا تدفئة من انصهار ، حيث فقد جليد الثلجة والثلج المتواجد تحت خط الثلج snow line أثناء موسم الانصهار . أما فى نطاق التراكم والمتواجد فوق هذا الخط فإن الثلج الجليدى يضاف إلى الثلجة المتكونة من الثلج المتراكم فى الشتاء السابق .

II. حركة المثالج

للجليد من أسفل ، وتسمى هذه الكسور شقوقا جليدية **crevasses**. وتنشأ تلك الشقوق الطولية على سطح مثلجة الوادي نتيجة للاختلاف في معدل الحركة بين أجزاء المثلجة المختلفة (شكل 8.14). وقد يصل عمق بعض هذه الشقوق إلى 100 متر من السطح. وتحدث الشقوق الجليدية بكثرة عندما يسحب الجليد عند جدران المنحنيات في الوادي ، حيث تزداد شدة الانحدار .



شكل (8.14): المعالم الرئيسة للمثلجة الوادي ورواسبها ، حيث قطعت المثلجة على امتداد خطها المركزي ، لتوضح نصفها فقط .
(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

III. الثلج ومعالم الأرض الجليدية

لا يظهر العمل الجيولوجي للمثلجة ، من تعرية ونقل وترسيب عند قاعدتها أو جوانبها، إلا بعد أن ينصهر الجليد ، مثلما لا نستطيع رؤية أثر القدم المطبوعة في الرمل إلا بعد تحرك القدم عن الأثر . ويمكن أن نستنتج العمليات الطبيعية التي نتجت عن تحرك الجليد

يبدأ الجليد في التحرك حينما يصل سمك الجليد إلى عشرات الأمتار فيستطيع التغلب على الجاذبية الأرضية ، وهكذا يتحول الجليد إلى مثلجة . وعندما تتحرك المثالج ، فإن الجليد يتشوه وينساب ببطء أسفل المنحدرات . ومن المهم أن نفهم الانسياب الجليدي ، لأن حركة المثالج هي المسؤولة عن العمل الجيولوجي الضخم الذي يقوم به الجليد . وفي الحقيقة ، فإن نتائج حركة الجليد من التعرية والنقل والترسيب هي التي ألهمت العلماء إلى أهمية حركة الجليد . وعلى عكس الانسياب السريع للأشجار والذي يمكن ملاحظته مباشرة وبسرعة ، فإن حركة المثالج تكون بطيئة لدرجة أنه يبدو أن الجليد لا يتحرك على الإطلاق . ويزداد معدل حركة المثلجة بازدياد شدة الانحدار أو زيادة سمك الجليد . وحتى على السطح المستوي ، مثل الأرض المنخفضة القارية فإن الجليد ينساب للخارج إذا زاد السمك بدرجة كبيرة . وتنساب المثلجة القارية وتتحرك للخارج نتيجة ازدياد السمك كما ينساب السائل اللزج على السطح المستوي . ولكن كيف ينساب الجليد وهو مادة صلبة ، كما لو كان سائلا لزجا يتحرك ببطء ؟

أ. ميكانيكية الانسياب الجليدي

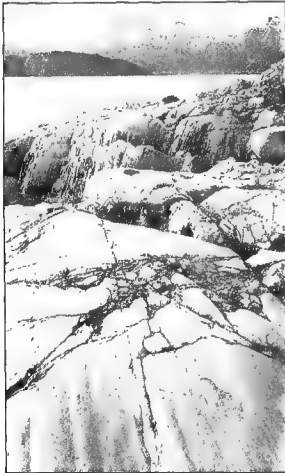
تنساب المثالج أساسا بميكانيكيتين هما الانسياب اللدن والانزلاق القاعدي . ففي الانسياب اللدن **plastic flow** يتشوه الجليد وينزق داخليا على نطاق ميكروسكوبي . أما في الانزلاق القاعدي **basal slip** ، فإن الجليد ينزلق على المنحدرات على قاعدة المثلجة ، مثلما تنزلق قطعة من الصخور على لوح خشبي مائل .

ويكون الضغط قليلا على الأجزاء العليا من المثالج (أقل من 50 متراً من سطح المثلجة) . ويسلك الجليد عند هذه الضغوط المنخفضة كجسم صلب قابل للكسر ، ويتكسر أثناء سحبه نتيجة الانسياب اللدن

الصخور الذى سقط على الثلجة من المنحدرات المجاورة .

1. معالم التجوية الجليدية الصغيرة

تحتوى قاعدة الثلجة معتدلة الحرارة على قطع صخرية ذات أحجام مختلفة تحملها الثلجة مع الجليد المتحرك . وتقوم الكسرات الصغيرة من الصخور والتي تحتويها قاعدة الثلجة بحك وكشط صخر الأساس الذى تتحرك فوقه الثلجة لتكون حزوزا طويلة ومتوازية تقريباً تسمى حزوزا جليدية **glacial striations** (شكل 9.14) . أما الكسرات الصخرية



نسخة (9.14) . الصفل والحزوز striations والأخاديد grooves الجليدية على صخر الأساس وتدل الحزوز على اتجاه حركة الجليد ، وتعتبر مفاتيح مهمة للاستدلال على حركة المثلج القارية .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

من طوبوغرافية المناطق التى كانت تشغلها المثلج سابقاً، والمعلم المميز التى تركتها. وتتضمن عملية النشلج **glaciation** عمليات التعرية والنقل والترسيب مثل بقية العمليات الجيولوجية التى تحدث على سطح الأرض .

أ - التجوية الجليدية ومعالم التعرية

للمثلج قدرة هائلة على تعرية الصخور الصلبة . ويمكن لثلجة وادى عرضها لايزيد عن بضعة مئات من الأمتار أن تمزق وتطحن ملايين الأطنان من صخر الأساس فى عام واحد . ويقوم جليد الثلجة بتعرية هذه الكمية الضخمة من الرواسب من الصخور المكون لأرضية وجوانب الثلجة ، التى ترسب بعد انصهار الجليد . ويعكس حجم هذه الرواسب قدرة الجليد كعامل تعرية أقوى من الماء أو الرياح . ويمكن أن نقارن بين معدلات وكميات الرواسب المترسبة فى العصور الجليدية والفترات الفاصلة بين تلك العصور . وتوضح هذه المقارنات أن كمية الرواسب الكلية المترسبة فى عيطات العالم كانت أكبر عدة مرات خلال العصور الجليدية الحديثة عنها خلال العصور غير الجليدية . ويرجع هذا الفرق إلى التعرية الشديدة بالمثلج مقارنة بالتعرية بالماء أو الرياح .

وعند تغيير شكل سطح الأرض الذى تتحرك فوقه الثلجة ، تعمل الثلجة مثل ماكينة جرف الثلج وآلة المبرد الحديدية بالإضافة إلى عمل الزلاجة . فهى تشبه جرافة الثلج التى تجرف الصخور والتربة التى تم تجويتها ، كما تقتلع كتلا من صخر الأساس . وتعمل الثلجة مثل آلة المبرد الحديدية ، حيث تكشط الصخر الصلب . كما تعمل مثل الزلاجة ، حيث تحمل الحمولة الناتجة من عمليتى الجرف والكشط ، بالإضافة إلى ركام

دائرة الجليد: تعتبر دوائر الجليد ضمن أكثر المعالم المميزة للجبال الثلجية شيعا . وتنشأ دائرة الجليد ضمن سلسلة من أشكال التعرية تقوم بنحتها مئالج الوديان أثناء انسيابها من مكان نشأتها إلى حدودها السفلية . ومع استمرار التعرية ، تزداد دوائر الجليد في الحجم عند رؤوس الوديان وتتقارب وتتقابل تدريجيا عند قمة الجبل لتكون مرتفعا مستطيلا قمته حادة مسننة يعرف بعjid الثلجة **arête** . وعندما تنحت ثلاث دوائر جليدية أو أكثر في قمة الجبل ، تتكون قمة حادة مرتفعة هرمية الشكل ، ذات جوانب شديدة الانحدار تعرف بالقرن الجليدي **horn** (شكل 10.14).

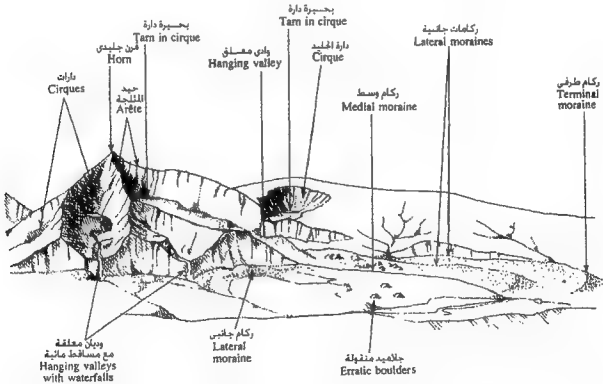
الوديان الجليدية: تختلف الوديان الجليدية **glacial valleys** التي شكلتها مئالج سابقة عن وديان الأنهار أو المجارى المائية العادية عموما في جوانب عدة . فعندما تتحرك ثلجة الوادى وتنحدر من الدوائر الجليدية ، فإنها تنحت واديا أو تعمق مجرى مائيا سابقا ،

الأكبر حجما والتي تقوم الثلجة بسحبها على صخر الأساس ، فإنها تحفر أخاديد جليدية **glacial grooves** تصطف في اتجاه انسياب الثلجة . وتعمل حبيبات الرمل الدقيق والغرين والمحمولة في جليد قاعدة الثلجة مثل ورق السفرة ، حيث تقوم بصقل الصخر حتى يصبح سطحه ناعما وعاكسا للضوء .

وحيث إن الحزوز والأخاديد الجليدية تكون مصطفة ومرتبطة في اتجاه انسياب الجليد ، فإنها تستخدم بالإضافة إلى بعض معالم التوجيه المصطفة الأخرى في استنتاج مسار انسياب المئالج بعد زوالها .

2. المعالم الأرضية للجبال الثلجية

إن المناظر الطبيعية الخلابة لمعظم جبال العالم المرتفعة هي نتيجة مباشرة للنحت الجليدي الذى كون مجموعة مميزة من المعالم الأرضية وهى :



شكل (10.14): بعض المعالم الثلجية المصاحبة لثلجة الوادى .

(After Foster, R.J., 1988: General Geology, 5th edition, Merrill Publishing Company, Columbus).

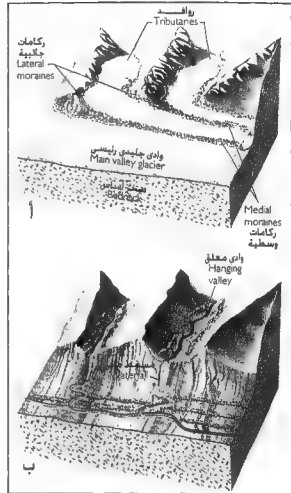
ولا تختلف المثلج والمجاري المائية في شكل الوديان التي تكونها فقط ، بل في الطريقة التي تتصل بها الروافد مع الوديان الرئيسية . فعلى الرغم من أن سطح الجليد يكون مستويا عند النقطة التي يلتقي فيها رافد المثلجة مع الوديان الرئيسية للمثلجة ، إلا أن قاع الوديان الرافد قد يكون مرتفعا جدا عن الوديان الرئيسية . وعندما يذوب الجليد وتزول المثلجة ، فإن الوديان الرافد يكون قاعه أعلى من قاع الوديان الرئيسية ، ولذلك يعرف بـ **hanging valley** (شكل 11.14) . وبعد ذوبان الجليد ، فإن المجاري المائية تشغل هذه الوديان ، حيث يتميز اتصال الوديان الرئيسية بالرافد بوجود مساقط مائية **waterfalls** نتيجة أن المجري المائي في الوديان المعلقة يندفع بسرعة على الحرف شديد الانحدار الذي يفصله عن الوديان الرئيسية تحته .

3. المعالم الجليدية الناشئة عن المثلج القارسة والقلنسوات الجليدية

معالم السحج : يظهر على صفحة الأرض التي شكلتها الفرش الجليدية معالم التعرية الصغيرة نفسها والمميزة للوديان المثلجة . وتساعد الحزوز **striations** الجليدية في الاستدلال على خطوط انسياب ومسارات الفرش الجليدية التي تلاشت منذ مدة طويلة .

- التلال والقدور الجليدية: يلاحظ في عديد من المناطق التي كانت تشغلها المثلج القارسة أن سطح الأرض قد تحول إلى مجموعة من التلال (حيود) الناعمة الانسيابية المتوازية تقريبا ، والتي تسمى بالتلال الجليدية **drumlins** ، حيث يكون اتجاه استيطانها هو اتجاه تحرك الجليد (شكل 12.14) . وتوجد التلال الجليدية في مجموعات ، وتأخذ عادة شكل سفينة مقلوبة ، حيث يساعد هذا الشكل على تقليل مقاومة الأجسام لجليد المثلجة المنساب فوقها وحولها . ويتراوح ارتفاع التلال الجليدية من 25 إلى 50 مترا ،

ويتكون نتيجة لذلك وادي له بروفي (مقطع جانبي) يشبه الحرف U ، ويعرف بـ **U-shaped valley** . وتكون الوديان الجليدية ذات قيعان مستوية وحوائط شديدة الانحدار ، على عكس الوديان المتكونة في عديد من الأنهار المتحدرة من الجبال والتي يأخذ بروفيها شكل حرف V .



شكل (11.14): نشأة الوديان المعلقة **hanging walls** والمساقط المائية **waterfalls** من روافد مثلج الوادي .

(أ) تلتقي الروافد المثلجية أثناء عملية التلجج بـ مثلجة رئيسية على مستويات مختلفة
(ب) بعد انتهاء عملية التلجج ، ينصهر الجليد وتبقى المنطقة بالوديان المعلقة . ويكون المجري المائي مسقطا مائيا عندما يندفع فوق جانب الوديان المعلقة .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

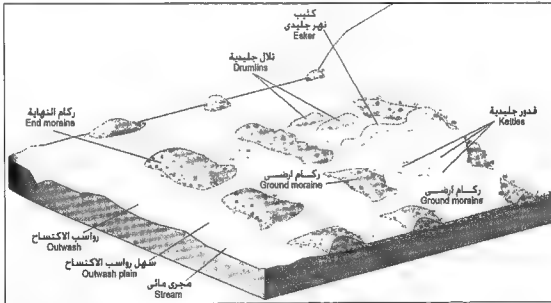
على جوانب أو حتى فوق سطح الثلجة ، كما تستطيع الثلجة حل أحجام من الصخر أكبر لمسافات بعيدة . كما يمكنها نقل القطع الصخرية الصغيرة والكبيرة جنباً إلى جنب دون أن تفرزها طبقاً للحجم أو الكثافة إلى حمل قاع وحمل معلق ، كما هو الحال في الأنهار . ولذلك تكون الرواسب التي تكونها الثلجة رديئة الفرز وغير متطبقة .

ويتركز حمل الثلجة عند قاعها وجوانبها ، حيث يتناسق في تلك المناطق صخر الأساس مع الثلجة ، وحيث تكون عمليتي السحج abrasion والاقترلاع plucking (شكل 8.14) مؤثرتين . ويرجع وجود معظم الركام الصخري فوق سطح مثالج الوادى إلى الصخور المتساقطة من الجروف المجاورة لها . وعندما تلتقى مثلجتان ، يندمج الركام الصخري عند حوافها ليكونا ركاماً جليدياً moraine وسطياً يميزا لونه داكن .

بينما يبلغ طولها حوالى كيلومتر واحد . وتتكون التلال الجليدية من رواسب ترسب معظمها بالجليد . وتوجد بعض التلال الجليدية المتكونة من صخر الأساس ، وتسمى تلالاً جليدية صخرية rock drumlins ، حيث يرجع تكونها إلى التعرية بالجليد المنساب . كما تتميز المناطق التي كانت تشغلها المثالج القارية بوجود حفر ومنخفضات نشأت عن تجمع الرواسب في مقدمة الثلجة المتراجعة حول كتل من الجليد الراكدة ، حيث تدفن تلك الكتل الجليدية . وعندما تنصهر كتل الجليد في النهاية ، تتكون حفر أو منخفضات تعرف بالقُدُور الجليدية kettles (شكل 12.14) .

ب. نقل الرواسب بالمثالج

تختلف الثلجة عن المجرى المائى في الطريقة التي يتم بها نقل حولة الجيبيات الصخرية . فعلى عكس المجرى المائية ، فإن جزءاً من الحمل الخشن للثلجة يمكن حمله



شكل (12.14). معالم الجليد الناشئة عن تراجع قريشة جليدية receding ice sheet . وتشمل تلك المعالم التلال الجليدية drumlins وهي تلال متوازية تقريباً يكون اتجاه استيطانها هو اتجاه تحرك الجليد . كما تشمل أيضاً الأنهار الجليدية eskers وهي رواسب تراكمت على امتداد طويل ، وتكونت من مجرى مائى يسيل تحت الجليد . ومنها أيضاً القُدُور الجليدية kettles وهي حفر أو منخفضات صغيرة في رواسب الثلجة ، نشأت عن تراكم الرسوبيات حول كتلة من الجليد ذابت بعد هذا التراكم وتركت مكانها غالياً على هيئة قعر .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlson, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

ترسبت مباشرة من الجليد ، وتحتوى على كافة أحجام الفتات من الصلصال والرمل وحتى الجلاميد . ويمثل الحريث أحد نهايتى السلسلة التى تتدرج من الرواسب الجليدية غير المفروزة إلى الرواسب الجليدية المفروزة . وتتواجد الحبيبات الصخرية فى الحريث بنفس حالتها عند ترسبها من الجليد . وتتكون معظم رواسب الحريث من خليط عشوائى من الفتات الصخرى ، حيث تحيط أرضية من راسب دقيق التحبيب بفتات صخرى مكون من مختلف الأحجام . وتكون أسطح الحصى والفتات الصخرى الأكبر حجما فى الحريث ناعمة ومسحوجة ، كما يكون فى بعضها حزوز striations . ويميل كل من الفتات وحبيبات الأرضية الخشنة إلى أن ترتب بحيث يوازي محور استطالتها اتجاه حركة الجليد أثناء انسيابه . وتساعد مثل هذه القطع فى تمييز الحريث من الرواسب الأخرى ، والتي قد تتكون من خليط من رواسب مختلفة الحجم مثل الحطام الناشئ أثناء الانهيارات الأرضية من الانسياب الطينى أو الانزلاق الصخرى .

وصخر الحريث (تليليت) tillite هو حريث قديم أصبح صخورا ، خاصة الحريث الأقدم من البليستوسين . وفى معظم الأحيان ، لا تكون كل الجلاميد والكسرات الصخرية الأصغر حجما فى الحريث مكونة من نوعية صخر الأساس نفسها ، الذى يسفل الثلجة . ويدل ذلك على أن مكونات الحريث قد نقلت إلى موقعها الحالى من مكان آخر . وتسمى الكسرات الصخرية المترسبة من الثلجة ، والتي يختلف تركيبها الصخرى عن تركيب صخر الأساس bedrock الذى يسفلها بالجلاميد المنقولة (الشاذة) erratics (من اللاتينية بمعنى طواف أو هائم) . وقد تزن بعض الجلاميد المنقولة الضخمة مئات الأطنان ، وتوجد على بعد عشرات أو حتى مئات الكيلومترات

ويتكون معظم الحمل فى جليد قاع الثلجة من صخر مطحون ناعم للغاية (حجم الرمل الناعم جدا والغرين) يعرف باسم دقيق صخرى rock flour ، حيث تكون أسطح الحبيبات حادة ومزودة نتيجة التكسير والطحن . وينشأ الدقيق الصخرى نتيجة احتكاك الفتات الصخرى الذى يحمله الجليد بصخور مجرى الثلجة .

ج. الرواسب الجليدية

تسمى كل الرواسب المتكونة سواء بالثلجة نفسها أو بالمجارى المائية الناشئة عن انصهار جليد الثلجة ، منجرفات مثلجيه glacial drift ، أو للتبسيط منجرفات drift سواء على اليابس أو فى البحر . ويرجع استخدام اسم المنجرفات إلى أوائل القرن التاسع عشر ، حينما ساد اعتقاد غامض بأن كل هذه الرواسب قد انجرفت إلى أماكن استقرارها خلال فيضان سيدنا نوح عليه السلام أو بواسطة مجارى مائية قديمة أخرى . وتضم المنجرفات الثلجية الرواسب المرتبطة بالجليد المتحرك أو الجليد الراكد غير المتحرك . وقد تم التعرف على عديد من الرواسب التى تكون سلاسل متدرجة من رواسب غير مفروزة إلى رواسب تم فرزها . ومن الخصائص التى تميز المنجرفات عن بقية الرواسب التى نشأت بعوامل تعرية أخرى ، أن الرواسب الجليدية تتكون أساسا من حطام صخرى تم تجويته ميكانيكيا ولم يتعرض إلا لقليل من التجوية الكيميائية قبل الترسيب . ولذلك تشمل مكونات الرواسب الجليدية المعادن التى تكون عرضة للتحلل الكيميائى مثل معادن المورنيلند وفلسبارات البلاجيوكليز .

1. الرواسب المتكونة بالجليد

الحريث والجلاميد المنقولة: الحريث (تِلّ) till عبارة عن منجرفات مثلجية غير مفروزة nonsorted

وتندمج الركامات الجانبية لمثلجتين متحدثتين ليكونا ركاماً وسطياً medial moraine (شكل 11.14).

والركام الأرضي ground moraine هو طبقة من المنجرفات الجليدية ترسبت تحت الجليد . ويتراوح سمك الركامات الأرضية من الرقيق مع وجود هضاب صغيرة وأرضيات مكشوفة من صخر الأساس ، إلى الكبير الذي يكفي لتغطية وإخفاء صخر الأساس تماماً.

2. الرواسب المتكونة بالماء: المنجرفات المتطبقة

تتكون بعض المنجرفات الجليدية من رواسب متطبقة ومفروزة ، عكس الحريث والمنجرفات الجليدية البحرية المترسبة على قاع المحيط ، غير المفروزة عموماً . وهذا النوع من المنجرفات الجليدية لا يترسب مباشرة من جليد المشالج . ولكن يتكون من المياه المنصهرة والمنسابة من الجليد . ويتراوح حجم المنجرفات المتطبقة من حصي رملي خشن رديء الفرز جداً ترسب من مجارى مائية مضطربة إلى رواسب غرين وصلصال جيد الفرز ترسب من مياه ساكنة .

رواسب الاكتساح: يسمى الراسب المتطبق المتكون في مجارى المياه التى تنساب من حافة المثلجة عند انصهارها برواسب الاكتساح أو الرواسب سهلة الغسل outwash ، حيث يغسل الراسب بعيداً عن الجليد (شكل 8.14) . ومثل هذه المجارى المائية يكون لها نمط مجذول بسبب هولة الراسب الكبيرة .

وتسمى تراكمات الغرين والصلصال المترسبة على قاع بحيرة عند حافة المثلجة ، والتي تشمل طبقات متبادلة من طبقات خشنة الحبيبات وأخرى دقيقة الحبيبات بالصلصال الرقاقي الحولى varve . ويتكون هذا الراسب من زوج من الطبقات المتكونة خلال عام واحد بسبب التجمد الموسمي لسطح البحيرة . ففى فصل الصيف ، وعندما تكون البحيرة خالية من

من مصدرها الأصل . وتسمى المنجرفات المترسبة على قاع البحر من الأرفف الجليدية بمنجرفات جليدية بحرية glacial marine drift .

الركامات الجليدية: تحمل المثلجة المتحركة ركاماً صخرياً ناتجاً من تعرية الأرض التى مرت عليها المثلجة ، أو المتساقط على سطح المثلجة من الجحروف المجاورة . وعندما يُنقل الركام ويبدأ الجليد في الذوبان وينقص سمك الجليد نتيجة عملية النفاد ، يبدأ الركام في الترسيب . وتسمى المنجرفات التى حملها الجليد ثم تراكمت بعد انصهاره ، ولا يكون لشكل سطحها علاقة بصخر الأساس الموجود أسفلها بالركام الجليدي (مورين) moraine . وقد استخدم هذا المصطلح في الأصل الفلاحون الفرنسيون لوصف الهضاب المكونة من الركام بالقرب من حواف المشالج في جبال الألب الفرنسية . وتتكون كل أنواع الركامات الأرضية بغض النظر عن الشكل أو الموقع من رسوبيات الحريث . وربما يكون مصطلح الركام الجليدي أكثر المصطلحات شيوعاً في المعالم الأرضية المكونة من رواسب ثلجية .

وهناك عدة أنواع من الركامات الجليدية ، يسمى كل منها طبقاً لوضعه بالنسبة للمثلجة التى تكوّن منها . وأكثر هذه الأنواع وضوحاً في الحجم والشكل هو ركام النهاية (مورين النهاية) end moraine (شكل 8.14) ، والذي يتراكم عند مقدمة المثلجة على شكل حيود أو تل مستطيل من المنجرفات الجليدية . وتسمى الركامات النهائية التى تمجدد أقصى تقدم للمثلجة بالركامات الطرفية terminal moraines ، وهى تعتبر من أفضل الأدلة لمعرفة الامتداد السابق للمثلجة . وتسمى المنجرفات الجليدية المتحركة على امتداد جوانب الوادى بالركام الجانبي lateral moraine .

IV. العصور الجليدية: تتلج البليستوسين

بدأ العلماء الأوروبيون منذ عام 1821م في تعرف معالم وخصائص التلج في أماكن بعيدة عن أى مثالـج حالية . وتوصلوا إلى أن التالـج قد غطت يوما ما مناطق شاسعة . وقد كان العالم السويسرى لويس أجاسى Louis Agassiz أول من اقترح مفهوم العصر الجليدى glacial age في عام 1837 م . وعلى الرغم من اعتقاد الكثيرين أن فكرة أجاسى كانت خيالية ، إلا أن مفهوم العصر الجليدى أخذ ينتشر تدريجيا على مدى واسع من خلال عمل عدد من الجيولوجيين . واليوم تمـدنا دراسة العصور الجليدية بالأدلة على التغيرات المناخية السريعة على مستوى الكرة الأرضية ، وبمعلومات عن كيفية استجابة الأنظمة الطبيعية والبيولوجية الطبيعية لتلك التغيرات . كما أنها تعطينا أيضا معلومات مهمة عن سلوك التالـج، وبالتالي المساعدة في فهم بعض العمليات الطبيعية الأساسية في الأرض والوشاح العلوى.

أ. مثالـج العصر الجليدى

حين دخلت الأرض حقب الحياة الحديثة Cenozoic Era المتأخر أخذ المناخ يبرد تدريجيا ويبطء على امتداد عشرات الملايين من السنين . وقد تعرضت الأرض خلال حين البليستوسين الذى يشمل المليونين الأخيرين من تاريخ الأرض لعدد من الدورات الجليدية - بين الجليدية ، والتى تخللت اتجاه المناخ نحو البرودة بشكل عام على المدى الطويل . وتوضح الدراسات أننا في الوقت الحالى قد اقتربنا من الحد الأقصى للدفع في هذه الدورة ، لئيد المـبوط في درجة الحرارة لنصل إلى عصر جليدى جديد ، والذى سوف يبلغ ذروته خلال عدة آلاف من السنين في المستقبل.

الجليد، ترسب الرواسب الحشنة عندما تنساب مجارى المياه المنصهرة من الثلجة إلى البحيرة ، ييسا في فصل الشتاء يتجمد سطح البحيرة ، ويصبح الماء أسفل هذا السطح ساكنا ، وترسب الصلصال الدقيق الحبيبات ، مكونا طبقة رقيقة فوق الطبقة الحشنة الحبيبات التى تكونت في فصل الصيف . ويعتبر الصلصال الرقائقى الحولى أحد أشكال رواسب الاكتساح .

3. تربة الصقيع الدائم

تكون الأرض في حالة تجمد دائم في المناطق شديدة البرودة ، حيث لا ترتفع درجة الحرارة في فصل الصيف إلا إلى الحد الذى يسبب انصهار طبقة سطحية رقيقة . وتغطي التربة المتجمدة طوال السنة حوالى 25٪ من سطح اليابس على الكرة الأرضية ، وتعرف بتربة الصقيع الدائم permafrost . وتشمل تربة الصقيع الدائم ، بالإضافة إلى التربة نفسها، التجمعات من بلورات الجليد في طبقات وأوتاد وكتل غير متظمة . وتختلف بالطبع نسبة الجليد إلى التربة ، وكذلك سمك تربة الصقيع الدائم من منطقة إلى أخرى . وقد يصل سمك طبقة الصقيع الدائم في آلاسكا وشمال كندا من 300 إلى 500 متر .

وتبقى الأرض تحت طبقة الصقيع الدائم والمعزولة عن البرودة القارصة عند السطح، في حالة غير متجمدة نتيجة التسخين بالحرارة الداخلية للأرض والمنسابة من أسفل . ويكون التعامل مع تربة الصقيع الدائم صعبا ، خاصة عند إقامة المشاريع الهندسية مثل إنشاء الطرق والمباني وتمديد أنابيب البترول ، حيث تنصهر هذه التربة أثناء الحفر ، ولايستطيع الماء المنصهر تخلل التربة التى مازالت متجمدة أسفل الحفر ، ولذلك يبقى عند التربة السطحية والمشبعة بالماء ، مما يؤدى إلى الزحف والانزلاق والتدهور .

الشالية إلى مسارات جديدة خارج حواف الجليد . وقد تكونت بحيرات تحدها سدود جليدية ، عندما سدت المثالج مجارى وممرات الصرف الموجودة قبل التثلج . كما تغيرت مواقع وأحجام البحيرات الواسعة التى يحدها الجليد ، والتى تكونت خارج حدود الغريشة الجليدية الممتدة في شرق أمريكا الشالية ، نتيجة تراجع الثلجة . كما تكونت بحيرات كبيرة يحفها الجليد في شمال آسيا أيضا عندما تحرك الجليد في اتجاه الجنوب في غرب سيبيريا وتسبب في تمزيق وسد مجارى الأنهار الرئيسية المنسابة ناحية الشمال .

ج. انخفاض مستوى سطح البحر

عندما تتكون مثالج كبيرة على اليابسة ، فإنها تستمد المياه اللازمة لتكونها واستمرارها من المحيطات . ونتيجة لذلك ، ينخفض مستوى سطح البحر في تناسب مع حجم الجليد المتكون على اليابسة . وقد انخفض مستوى سطح البحر في العالم حوالى 100 متر على الأقل خلال أحدث العصور الجليدية ، مما أدى إلى ظهور امتدادات كبيرة من الرفوف القارية الضحلة كأرض جافة . وفي هذا الوقت كان شاطئ المحيط الأطلنطى للولايات المتحدة جنوب نيويورك يبعد حوالى 150 كم شرق وضعه الحالى . وفي الوقت نفسه ، أدى انخفاض مستوى سطح البحر إلى اتصال بريطانيا بفرنسا عند المنطقة التى يشغلها القنال الإنجليزى الآن ، كما كونت أمريكا الشالية وآسيا كتلة أرضية متصلة عبر ما يعرف الآن بمضيق بيرنج Bering Strait (شكل 13.14) . وقد عملت هذه المناطق اليابسة وغيرها على انتقال الحيوانات والنباتات والإنسان بحرية بين مناطق اليابس التى تفصلها الآن مياه المحيطات .

وقد تكوّن فريش جليدى شاسع فوق شرق كندا منذ حوالى 30000 ألف سنة مضت في أواخر البليستوسين ، ثم بدأ في الانتشار نحو الجنوب ناحية الولايات المتحدة وغربا تجاه جبال روكى . وفي الوقت نفسه ، نشأ فريش جليدى آخر فوق الأراضي المرتفعة من اسكندنافيا وانتشر جنوبا وعبر شمال غرب أوروبا حيث غمر صفحة الأرض (شكل 13.14) . كما تكونت فرش جليدية شاسعة أخرى وانتشرت فوق المناطق القطبية الشالية من شمال أمريكا وأوراسيا ، والتى تضم بعض المناطق المغمورة الآن ببحار قطبية ضحلة ، وكذلك فوق سلاسل جبال غرب كندا . ولقد نمست الفرش الجليدية في جرينلاند وأنتاركتيكا وتقدمت عبر مناطق الرفوف القارية المجاورة ، والتى اكتشفت نتيجة انحسار سطح البحر . وتكونت أيضا مثالج في سلاسل الجبال الرئيسية في العالم ، والتى تشمل جبال الألب ، والأنديز والهمالايا وروكى ، بالإضافة إلى عدد أصغر من المدود الجبلية ، وعلى القمم المنعزلة المتناثرة حول العالم .

هذا ، وقد بلغت مساحة المثالج في العصور السابقة أكثر من 44 مليون كم² تمثل حوالى 29 ٪ من مساحة اليابس على الكرة الأرضية بينما يغطى جليد المثالج حاليا حوالى 10 ٪ فقط من مساحة سطح اليابس على الأرض ، يقع 84 ٪ من هذه المساحة في المنطقة القطبية الجنوبية .

ب. محولات المجارى المائية والبحيرات الجليدية

تتسبب الفرش الجليدية فوق القارات في تمزيق الأنهار (أنظمة المجارى المائية الرئيسية) . وقد تسبب التجاوز المتكرر للفرش الجليدية في زمن البليستوسين في تغيير مسارات أنهار ميسورى وأوهايو في أمريكا



شكل (13.14): المناطق التي غطاها الجليد في نصف الكرة الشمالي خلال العصر الجليدي الأخير . وتوضح الأسهم الاتجاه العام لانسياب الجليد. وقد رسمت خطوط الشواطئ كما كانت في ذلك الوقت، حيث كانت على مستوى أقل من الوضع الحالي بابتداء متر على الأقل. (After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

هدسون في كندا والتي كانت تقع منذ حوالي 20000 سنة بالقرب من مركز فريشة لوريتيد الجليدية Laurentide Ice Sheet الضخمة (شكل 15.1) في صعود مستمر نتيجة تعديل القشرة الأرضية بعد إزالة حمل الجليد. ويمكننا باستخدام مثل تلك الأدلة قياس المعدل الذي ارتفعت به صفوح القشرة الأرضية بدقة خلال آلاف السنين. ونمذنا مثل هذه القياسات بمعلومات مهمة عن سلوك الغلاف الصخري (الليثوسفير) والغلاف اللدن (الاستينوسفير) عند تعرضها لأحمال متغيرة.

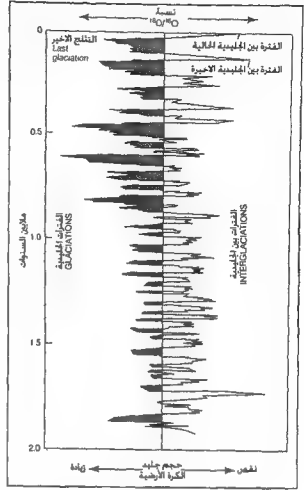
د. تشوه القشرة الأرضية

لقد سبب وزن القشر الجليدية الضخمة هبوط قشرة الأرض الموجودة أسفلها، وهى العملية التى سنستعرضها في الفصل السادس عشر (شكل 27.16). ويعنى الفرق في الكثافة بين صفوح القشرة الأرضية (حوالى 2.7 جم/سم³) وجليد الثلجة (حوالى 0.9 جم/سم³) أن القشرة الأرضية أسفل فريشة جليدية سمكها حوالى 3 كم قد تسبب هبوط القشرة الأرضية بمقدار 1 كم تقريبا. وماتزال منطقة خليج

أحدث رواسب المنجرفات الثلجية الشاسعة على اليابسة ، بناءً على تحديد العمر المطلق بالكربون المشع . وقد أظهر تحديد عمر هذه الرسوبيات البحرية والتي تكونت خلال 800000 سنة الأخيرة ، أن متوسط عمر الدورات الجليدية - بين الجليدية كان حوالي 100000 سنة . أما بالنسبة للبيستوسين كله ، فقد كُشف النقاب عن أكثر من 20 عصراً جليدياً ، بدلا من العصور الجليدية الأربعة التقليدية . وقد تحقق الجيولوجيون الآن من أن سجل التلج على اليابسة غير كامل وبه عدد من علاقات عدم التوافق ، بينما يحتوي عدد من البحار العميقة على سجل مستمر للترسيب .

1. الدليل من قاع البحر

تمدنا الرواسب البحرية العميقة بأدلة جيدة عن الدورات الجليدية - بين الجليدية . ويُظهر المحتوى الحفري لرواسب قاع البحر والتي أخذت من العينات الأسطوانية أثناء حفر الآبار وجود تغيرات متكررة في تركيب المجموعات النباتية والحيوانية في المياه السطحية من أشكال بين جليدية دافئة إلى أشكال جليدية باردة ، ثم العودة إلى الأشكال بين الجليدية الدافئة مرة أخرى . كما تتغير نسبة نظائر الأكسجين $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ في طبقات الحصى ooze (رواسب المحيطات العميقة) الجيرية بنفس النمط ، ويُعتقد أن تغيرات نسبة $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ هذه في رواسب البيستوسين البحرية تمثل أساسا تغيرات في حجم الجليد في العالم ، بناءً على تحليل هذه النظائر في الأصداف الموجودة في تلك الرواسب . فقد أظهرت الدراسات أنه عندما يتبخر الماء من المحيطات ويتساقط على اليابسة ليكون الثلج ، فإن الماء الذي يحتوي على نظير ^{18}O الأخف يتبخر بسهولة عن الماء الذي يحتوي على نظير ^{18}O الأثقل ، مما يعني أن مقداراً أكبر من نظير ^{18}O الثقيل يبقى في ماء المحيطات . ونتيجة لذلك ، فإن مثالج البيستوسين قد احتوت كمية أكبر من النظير



شكل (14,14): منحني متوسط التغير في نسبة نظائر $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ في عينات أسطوانية أُخذت من رواسب قاع المحيط الأطلنطي ، وتمثل التغير في حجم الجليد على مستوى الكرة الأرضية خلال المليون سنة الأخيرة من عمر الأرض . وخلال المليون سنة الأخيرة كان طول كل دورة جليدية - بين جليدية يصل إلى حوالي 100000 سنة ، بينما كان طول الدورات السابقة حوالي 40000 سنة .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

هـ. الثلجات المبكرة

كان يُظن حتى وقت قريب أن الأرض تعرضت لأربعة عصور جليدية خلال البيستوسين . وقد اتضح أنه لا بد من تغيير وجهة النظر التقليدية هذه عندما أثبتت دراسة الرسوبيات البحرية العميقة وجود تسابع سميك من رواسب المثالج . كما أظهرت تلك الدراسات أيضاً أن أحدث هذه الثلجات ، بضاهي

أ. العصور الجليدية وتغير وضع القارات

لقد أمكن التعرف في السجل الجيولوجي على تتابعات لعصور جليدية استمر كل منها عشرات الملايين من السنين . ويعتبر تغير المواقع الجغرافية بسيطاً هو أقرب الاحتمالات لتفسير النمط الخاص بتلك التتابعات . ويشمل التغير في المواقع الجغرافية (1) تحرك القارات نتيجة حركة ألواح الغلاف الصخري التي تحمل تلك القارات إلى خطوط العرض العليا أو بعيداً عنها ، (2) تكون سلاسل جبلية عندما يتراسب لوح فوق لوح آخر وكذلك نتيجة تصادم القارات، و(3) فتح وغلق الأحواض المحيطية والممرات البحرية بين كتل الأرض المتحركة .

وبالإضافة إلى ذلك ، فإن المثلج تكون شائعة على الأخص في الأماكن التي تمدها الرياح بالرطوبة والناجمة عن تبخير الماء من المحيط المجاور . واليوم ، فإن 84 بالمائة من جليد المثلج على الأرض يوجد في قارة أنتاركتيكا ، حيث تكون درجات الحرارة دائماً تحت درجة التجمد . والمثلج التي توجد عند خط الاستواء أو بالقرب منه تكون فقط عند الارتفاعات العالية للغاية .

ويشير عديد من الأدلة إلى أن مواضع الكتل الأرضية ، بالإضافة إلى شكلها وارتفاعاتها ، قد تغيرت مع الزمن (نظرية تكتونية الألواح) . وتؤدي هذه العملية إلى تغيير مسارات التيارات المحيطية وحركة الغلاف الجوي . وعندما نجد الآن الدليل على وجود تثلج حدث نتيجة فريشة جليدية سابقة في المناطق القريبة من خط الاستواء ، فإننا نستدل على أن تلك الأراضي كانت تقع قديماً بالقرب من المناطق القطبية حيث توجد إمكانية بقاء المثلج .

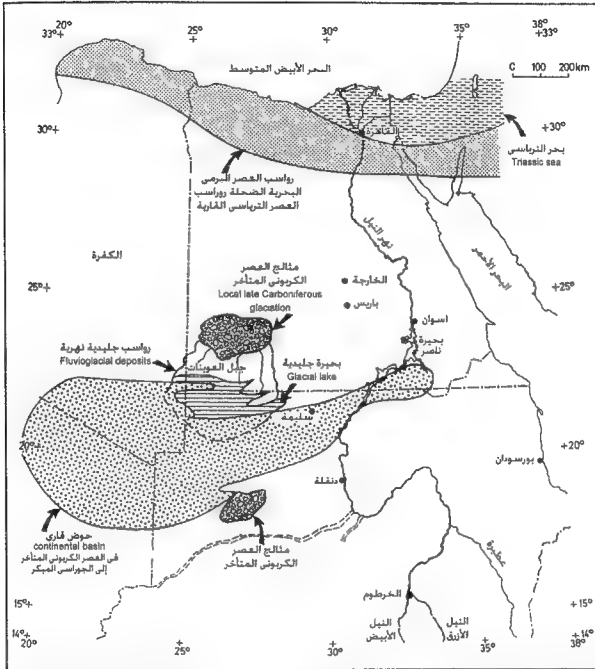
الأخف¹⁶ ، بينما احتوت المحيطات على كمية أكبر من النظير الأثقل¹⁸ امتصته الكائنات الحية . ولذلك فإن منحنيات النظائر المستمدة من رواسب قاع البحر تمدنا بقراءة مستمرة لتغير حجم الجليد على الأرض (شكل 14.14) . وحيث إن المثلج تزداد أو تنقص في الحجم استجابة للتغيرات المناخية ، فإن منحنيات النظائر تعطي أيضاً صورة عامة للتغيرات المناخية على الأرض .

2. التلججات قبل حين البليستوسين

تم تعرف مثلج أقدم من البليستوسين بناءً على وجود صخور الحريث والحزوز الجليدية على أسطح هذه الصخور . ويرجع عمر أقدم التلججات المسجلة إلى حوالي 2.3 بليون سنة مضت في دهر البروتريوزوي المبكر . كما حُددت فترات جليدية أخرى في صخور البروتريوزوي المتأخر إلى الباليوزوي المتأخر (حقب الحياة القديمة) . ويُعتقد أنه قد حدث أكثر من 50 تثلجاً خلال حقب الباليوزوي المتأخر فقط . ويوضح (شكل 15.14) المناطق التي غطاها الجليد في العصر الكربوني في جنوب غرب مصر ، والتي كانت تمثل جزءاً من قارة الجنديوانا في ذلك الوقت .

٧. أسباب حدوث العصور الجليدية

لقد أصبحت أسباب حدوث العصور الجليدية موضوعاً لبحوث مستمرة منذ أصبح الجيولوجيون مقتنعين بأن الأرض قد تعرضت لتتابع من العصور الجليدية ، ويحتاج الوصول إلى الحل نهائياً لمشكلة العصور الجليدية تضافر كل جهود المتخصصين في فروع العلم المختلفة . وفيما يلي استعراض لبعض أسباب حدوث العصور الجليدية .



شكل (14.15): المناطق التي غطاهما الجليد في العصر الكربوني في جنوب غرب مصر وشمال غرب السودان ، والتي كانت تمثل جزءا من قارة الجندوانا في ذلك الوقت .

وينكشف الآن في جنوب أمريكا وجنوب أفريقيا والهند وأستراليا وأنتاركتيكا رواسب جليدية من حقبة الحياة القديمة (الباليوزوي) المتأخر. وقد فُسر وجود صخور التيليت والصخور الجليدية الأخرى بأنها

رواسب مثاليّة قارية غطت لعدة مرات أجزاء شاسعة من قارة جنوبيّة ضخمة تسمى الجندوانا Gondwanaland ، والتي كانت تقع بالقرب من القطب الجنوبي . ونتيجة تكسر أجزاء كبيرة من

الطاقة المشعة التي تصل إلى أى خط عرض على سطح الأرض .

وقد أظهر إعادة ترتيب وتحديد عمر التغيرات المناخية خلال العصر الرابع أن التقلبات المناخية خلال الدورات الجليدية وبين الجليدية تقابل بدرجة كبيرة التغيرات الدورية في مدار الأرض ، وفي ميل محور الأرض . ويعضد هذا الدليل أن التغيرات الفلكية التي تحدد توزيع الأشعة التي تصل إلى سطح الأرض تتحكم في توقيت الدورات الجليدية وبين الجليدية .

ج . تركيب الغلاف الجوى

على الرغم من أن التغيرات في مدار الأرض واتجاه محورها وترتفعها تفسر توقيت الدورات الجليدية وبين الجليدية ، إلا أن التغيرات في الطاقة الإشعاعية للشمس التي تصل إلى سطح الأرض تكون صغيرة جداً لتسبب وتشرح التغير في متوسط درجات الحرارة (من 4 إلى 10° مئوية على الكرة الأرضية ، والتي تقتضيها ضمناً الشواهد الجيولوجية والبيولوجية . ولذلك ، فإن هناك عوامل أخرى يجب أن تؤخذ في الاعتبار ، منها الانخفاض الطفيف في درجات الحرارة والناتج عن التغيرات المدارية ، والذي يجب أن يترجم إلى تغير في درجة الحرارة يكفي لنشأة وحفظ الفرش الجليدية الضخمة في حين البليستوسين . ولا نعرف بالضبط كيف تم ذلك ، ولكن من المرجح أن بعض هذه العوامل تتضمن التغير في التركيب الكيميائي وتغير نسبة الغبار dustiness في الغلاف الجوى والتغير في انعكاس الأشعة من سطح الأرض .

وتعتبر فقاعات الهواء في جليد الثلجة في الفرش الجليدية ، والموجودة حالياً في أنتاركتيكا وجرينلاند ، أنها عينات من الغلاف الجوى القديم . وتدل دراسة التركيب الكيميائي للهواء المحبوس ، والذي يرجع تاريخه إلى أحدث عصر جليدى ، أن الغلاف الجوى

الجنودانا وحركة هذه الأجزاء بعد ذلك ناحية الشمال فإن عديداً من الصخور الجليدية القديمة توجد الآن في مناطق قريبة من خطوط العرض المنخفضة (شكل 5.17) .

ويشير اختفاء أى رواسب جليدية واسعة الانتشار في صخور حقب الحياة الوسطى (الميزوزوى) إلى أنه خلال ذلك الحقب تحركت معظم كتل اليابسة بعيداً عن المناطق القطبية إلى حيث كان المناخ معتدلاً . وقد تحركت الكتل الأرضية إلى المناطق القطبية مرة أخرى أثناء حقب الحياة الحديثة (السينوزوى) المبكر ، وكانت الحركات التكتونية بصدف رفع مساحات كبيرة من غرب الولايات المتحدة ووسط آسيا إلى ارتفاعات عالية . وفي حقب الحياة الحديثة المتوسط بدأت الأرض تتعرض مرة أخرى لعصر جليدى طويل آخر .

ب . العصور الجليدية والنظرية الفلكية

أثبتت دراسة الرواسب الجليدية في العينات الأسطوانية البحرية أن العصور الجليدية وبين الجليدية قد تبادلت لمدة 3 مليون سنة تقريباً . وقد مثل تحديد أسباب تلك العصور تحدياً أساسياً لتقديم نظرية شاملة عن المناخ القديم . وقد قدم الجيولوجى الاسكتلندى جون كروى John Croll أول تفسير لتلك الظاهرة في منتصف القرن التاسع عشر ، ثم طورها الفلكى المصرى (البوغوسلافى سابقاً) ميلوتين ميلانكوفيتش Milton Milankovitch في بداية القرن العشرين .

فقد أدرك كل من كروى وميلانكوفيتش أن التغيرات الصغيرة في مدار الأرض حول الشمس وفي ميل محور دوران الأرض على هذا المدار وفي ترتج (تميل) wobble الأرض قليلاً حول محور دورانها قد تؤدى إلى حدوث تغيرات طفيفة ولكن مهمة في كمية

أسطح انعكاس الثلج والجليد الأشعة إلى الفضاء ، مما يؤدي إلى زيادة تبريد الغلاف الجوي السفلى . ويؤدي ذلك ، بالإضافة إلى النسبة المنخفضة لغازات الدفينة وزيادة غبار الغلاف الجوي إلى زيادة واتساع المالحات وامتدادها .

د. التغيرات في دوران المحيطات

يلعب دوران ماء المحيط دوراً مهماً في مناخ الكرة الأرضية . فعندما يتبخر سطح الماء الدافئ المتحرك شمالاً في شمال المحيط الأطلنطي ، فإن ملوحة الماء المتبقى تزداد ويصبح الماء أكثر برودة . ويكون الماء المالح البارد أكثر كثافة ويغوص بعمق في المحيط . وتحافظ الحرارة المنبعثة إلى الغلاف الجوي نتيجة تبخر الماء ، على أن يكون المناخ معتدلاً نسبياً في شمال غرب أوروبا . ولنتنظر ماذا يحدث إذا توقف هذا الدوران؟

وعموماً ، فإن معدل دوران مياه المحيط العميق يكون حساساً لملوحة ماء السطح في المواقع التي يتكون فيها الماء عالي الكثافة . وقد أوضحت الدراسات أنه خلال أزمنة انخفاض الملوحة ، فإن حركة دوران مياه المحيط العميقة تنخفض . ولذلك فإنه يمكن افتراض أنه عندما تقل الطاقة الإشعاعية عند بداية الثلج ، فإن المحيط والغلاف الجوي يبرد عند خطوط العرض العليا (بالقرب من المناطق القطبية) مما يؤدي إلى انخفاض التبخر وزيادة اتساع جليد البحر . وتؤدي عذوبة المياه السطحية عند خطوط العرض العليا إلى وقف تكون ماء مالح عالي الكثافة ، ولذلك يتوقف نظام الدوران الرأسي لمياه المحيط . ويؤدي انخفاض التبخر عند خطوط العرض العليا إلى انخفاض ملحوظ في انطلاق الحرارة إلى الغلاف الجوي ، ولذلك تبقى كتل الهواء البارد المتحركة في اتجاه الشرق عبر شمال الأطلنطي . وتؤدي زيادة البرودة نتيجة الغطاء الجليدي في البحر المعتدل في شمال الأطلنطي والفرش

أثناء الثلج احتوى على نسبة أقل من ثاني أكسيد الكربون والميثان عما هو عليه الآن . ويعرف هذان الغازان المهمان من بين غازات الدفينة greenhouse gases (الدفينة بيت زجاجي لزراعة النباتات) . فعندما تكون نسبتهما عالية في الغلاف الجوي ، فإنهما يسببان حبس الطاقة الإشعاعية المنبعثة من سطح الأرض . والتي تهرب إلى الفضاء في الأحوال الأخرى . ونتيجة لذلك ، ترتفع درجة حرارة الغلاف الجوي السفلى ، ويصبح مناخ الأرض أكثر دفئاً . أما إذا كان تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون والميثان منخفضاً ، كما كان الحال أثناء الأزمنة الجليدية ، فإن درجة حرارة هواء سطح الأرض تنخفض . ويُعتقد أن المستويات المنخفضة لهذين الغازين المهمين في الغلاف الأرضي خلال الأزمنة الجليدية قد سببا انخفاضاً في درجة الحرارة خلال العصور الجليدية بمقدار النصف تقريباً . ولذلك تلعب غازات الدفينة دوراً مهماً في شرح كمية التغير في درجة حرارة الأرض في الماضي . وبالرغم من معرفتنا أن نسبة هذين الغازين قد انخفضت خلال الأزمنة الجليدية ، إلا أننا لا نعرف على وجه التأكيد ما سبب هذا الانخفاض .

وقد أوضحت دراسة العينات الأسطوانية في الجليد أن كمية الغبار كان مرتفعة خلال العصور الجليدية . وقد حملت الرياح القوية الغبار الدقيق عند هبوبها عبر رسوبيات الاكتساح المتكونة في مجاري المياه التي تنساب من حافة الثلجة عند انصهارها ، والأحواض الصحراوية الجافة . وقد أدت كمية الغبار العالقة في الغلاف الجوي لأن تكون السماء غائمة معظم الوقت . ويؤدي غبار الغلاف الجوي الدقيق إلى تفرق الأشعة المرسلة إلى سطح الأرض في الفضاء ، مما يؤدي أيضاً إلى زيادة تبريد سطح الأرض . وعندما تدخل الأرض في العصر الجليدي ، فإن مساحات كبيرة من سطح الأرض تتغطي باستمرار بالثلج وجليد المالح . وتفرق

عند المراكز المحدية للقرينة الجليدية، حيث يصبح الجليد سميكا للدرجة التي يبدأ فيها في الانحدار. وخلال فترات المناخ المستقر، يبقى حجم الثلجة ثابتا بسبب أن الثلجة تستعوض خلال تراكم الجليد، ذلك المفقود منها بالانصهار والتسامي والانفصال الجليدي في نطاق النفاذ. وعموما، فإن الثلجة تنكمش خلال الفترات الدافئة نتيجة زيادة عملية النفاذ عن التراكم، وبالعكس تمتد الثلجة عندما يزيد التراكم عن النفاذ في المناخ البارد.

6. تتحرك المثلج نتيجة عمليتي الانسياب الداخلي للندن في المناطق الباردة جداً والانزلاق القاعدي في المناخات الأكثر دفئاً.

7. تقوم المثلج بتعرية الصخور بعمليات الاقتلاع والسحج. ويشمل الركام الصخري المنقول عند قاعدة وجوانب الثلجة كسرات تتراوح بين حجم دقيق صخري ناعم إلى جلايم كبيرة.

8. تقوم المثلج الجبلية بتعرية وديان المجارى المائية إلى وديان متلجة لها بروفيل يشبه الحرف ل مع وجود دارات (حفر عميقة مستديرة) عند قسم هذه الوديان. وتُحفر الفيوردات تحت مستوى سطح البحر بالمثلج في المناطق الساحلية عند خطوط العرض العليا.

9. المنجرفات الثلجية هي رواسب ترسبت بالمثلج والمياه الناتجة عن انصهارها. ويترسب الحريث (تل) مباشرة من المثلج، بينما ترسب المنجرفات الثلجية البحرية على قاع المحيط من جليد المثلج الطافي. وتضم المنجرفات المتطبقة رواسب الاكتساح المترسبة بمجارى المياه المنصهرة. وتسمى المنجرفات التي حملها الجليد ثم تراكمت بعد انصهاره بالركام الجليدي (مورين).

الجليدية النامية فوق القارات، إلى أن يزداد مناخ أوروبا برودة، مما يؤدي في النهاية إلى تكون أرض دائمة التجمد طوال السنة (تربة الصقيع الدائم permafrost)، في نطاق كبير خلف حدود القرينة الجليدية. وهكذا، فإن التغير في نظام دوران المحيط يؤدي إلى زيادة التأثير المناخى المحدود نسبيا، والذي يرجع إلى التغيرات الفلكية. وعلاوة على ذلك، فإنه يساعد في تفسير مناخ الكرة الأرضية المتقلب بين حالتين مستقرتين نسبيا - واحدة يعمل خلالها نظام دوران المحيط (خلال الأزمنة بين الجليدية) وأخرى يتوقف فيها هذا النظام (خلال أزمنة الثلج).

المخلص

1. المثلج أجسام دائمة من جليد متحرك تتكون في معظمها من ثلج أعيد تبلوره.
2. تصنف المثلج بناءً على شكلها وحجمها إلى قسمين رئيسيين هما المثلج الجبلية والقلنسوات الجليدية (مثلج الوادى ومثلج بيدمنت ومثلج الدارة ومثلج فيورد وقلنسوات جليدية) والثاني هو المثلج القارية والرفوف الجليدية.
3. يكون الجليد في الثلجة معتدلة الحرارة عند نقطة الانصهار الجليدى، حيث يوجد الماء السائل عند قاعدة الثلجة، بينما يكون الجليد في الثلجة القطبية تحت نقطة الانصهار الجليدى ويصبح متجمداً كصخر تستقر عليه الثلجة.
4. تتكون المثلج فقط عند خط الجليد أو فوقه، والذي يكون بالقرب من مستوى سطح البحر في المناطق القطبية ويكون عند ارتفاعات عالية من المناطق المدارية.
5. يزداد الجليد في السمك نتيجة تراكم الثلج، أما عند قمم الجبال التي تنحدر منها مثلج الوادى أو

الشمس وفي ميل محور دوران الأرض على هذا المدار ترتبط وتتحكم في توقيت الدورات الجليدية - بين الجليدية ، وتؤثر كذلك في توزيع الطاقة الإشعاعية للشمس التي يستقبلها سطح الأرض . وقد يساعد التغير في تركيز ثاني أكسيد الكربون والميثان والأثرية في الغلاف الجوي في شرح الانخفاض في درجة حرارة الأرض خلال العصور الجيولوجية ، بينما قد يساعد التغير في دوران المحيط في شرح التغيرات بين الحالات الجليدية والجليدية المستقرة لنظام المناخ .

10. تناوبت العصور الجليدية مع العصور بين الجليدية والتي قاربت درجات الحرارة فيها درجات الحرارة الموجودة اليوم . وتدل دراسات العينات الاسطوانية البحرية أن أكثر من 20 دورة جليدية - بين جليدية قد حدثت خلال حين البليستوسين .

11. قد ترتبط العصور الجليدية في تاريخ الأرض بأوضاع القارات وأحواض المحيطات التي نتجت من حركات ألواح الغلاف الصخري . ويبدو أن تغيرات في مدار الأرض حوال

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://www.museum.state.il.us/exhibits/ice_ages/
<http://www.nsidc.colorado.edu/>
<http://www.ec.gc.ca/climate/index.html>
<http://www.nsidc.colorado.edu/NSIDC/gallery.html>
<http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/paleo.html>
<http://www.museum.state.il.us/exhibits/larson/>

المصطلحات المهمة

ablation	نفاد	ice cap	قلنسوة جليدية (ج. قلاانس)
accumulation	التركم	ice sheet	(فريشة جليدية) غطاء جليدي
arête	حيد المتلجة	ice shelf	رف جليدي
basal slip	انزلاق قاعدي	moraine	ركام جليدي (مورين)
calving	انفصال جليدي	outwash	رواسب اكتساح
cirque	دائرة الجليد	piedmont glacier	مثلجة بيدمنت
continental glacier	مثلجة قارية	permafrost	تربة الصقيع الدائم
crevasse	شق جليدي	plastic flow	انسياب لدن
drift (=glacial drift)	منحرفات مثلجية	plucking	اقتلاع
drumlin	تل جليدي	polar glacier	مثلجة قطبية
erratics	جلاميد منقولة	pressure melting point	نقطة الانصهار الضغطي
firn	ثلج جليدي	rock flour	دقيق صخري
fjord	فيورد (ج. فيوردات)	snow	ثلج
glacial drift	منحرفات مثلجية	snow line	خط الثلج
glacial wash	غسل مثلجة	striation, glacial	حز جليدي (ج. حزوز)
glaciation	تثلج	sublimation	تسامي
glacier	مثلجة (ج. مثالج)	temperate glacier	مثلجة معتدلة الحرارة
hanging valley	وادي معلق	till	حريث
horn	قرن جليدي	tilt	صخر الحريث
ice	جليد	U-shaped valley	وادي مشابه لحرف U
iceberg	جبل جليد	valley glacier	مثلجة الوادي
		varve clay	صلصال رقائقي حولي

الأسئلة

1. كيف يمكن التمييز بين مثالج الوادى والمثالج
القارية ؟
2. ما خط الثلج ؟ وما علاقة المثالج بهذا الخط ؟
3. اذكر خطوات تحول الثلج إلى جليد مثلجة .
4. اذكر الطرق التى تؤثر بها درجة حرارة الجليد على
طريقة حركة الثلجة .
5. اشرح كيف يمكن استخدام معالم التعرية فى
الاستدلال على اتجاهات انسياب المثالج السابقة .
6. اذكر ثلاثة أنواع من الرواسب المثلجة .
7. كيف يمكن التمييز بين الحريث ومنجرف متطبق
عند فحص مكاشف تلك الرواسب ؟
8. تحتوى بعض أجزاء الثلجة على كثير من
الرواسب ، بينما تحتوى بعض الأجزاء الأخرى
على القليل جداً من الرواسب . ما السبب ؟
9. اذكر الكيفية والمقدار التقريبى الذى يرتفع
وينخفض به مستوى سطح البحر خلال الدورات
الجليدية - بين الجليدية .
10. ما التغيرات فى مدار الكرة الأرضية التى تؤثر
على المناخ ؟
11. ما الدليل الذى تم الحصول عليه من العينات
الأسطوانية فى الرواسب البحرية العميقة والذى
يدل على أن الدورات الجليدية - بين الجليدية قد
تكرر حدوثها خلال حين البليستوسين ؟
12. قارن بين أنواع الحريث التى يمكن توقعها فى
منطقتين مثلجتين ، يوجد بإحدهما صخور
جرانيتية وصخور متحولة ، ويوجد بالمنطقة
الأخرى طفل ناعم ورمال مترسبة ومفككة .

ا. العمل الجيولوجى للرياح

أ - نظام الرياح على كوكب الأرض

1. نمط الرياح على سطح الأرض

2. أحزمة الرياح

3. تأثير كريولى

4. تأثير السلاسل الجبلية

ب - حركة الرواسب بالرياح

1. نقل الرمال بالرياح

2. نقل التراب بالرياح

جـ - التعرية بالرياح

1. التذرية

2. سفح الرمال

د - الترسيب بالرياح (الرواسب الرملية)

1. الكثبان الرملية

2. بحار الرمال

3. لويس: الأتربة المتساقطة

4. الرماد البركانى

II. الصحارى

أ - مناطق تواجد الصحارى

ب - مناخ الصحراء

جـ - التجوية فى الصحراء

1. المجارى المائية عامل تعرية مهم فى الصحارى

د - الرواسب والترسيب فى الصحارى

III. معالم الأرض في الصحارى

أ - المراوح الفيضية (الطميية) والبجادا (المنحدرات
الطميية)

ب - البيدمنت (الصفوح الجبلية)

جـ - الجبال المنعزلة (الجزيرية)

د - المسات (الربوات) والبيوتات (التلال النضيدية)

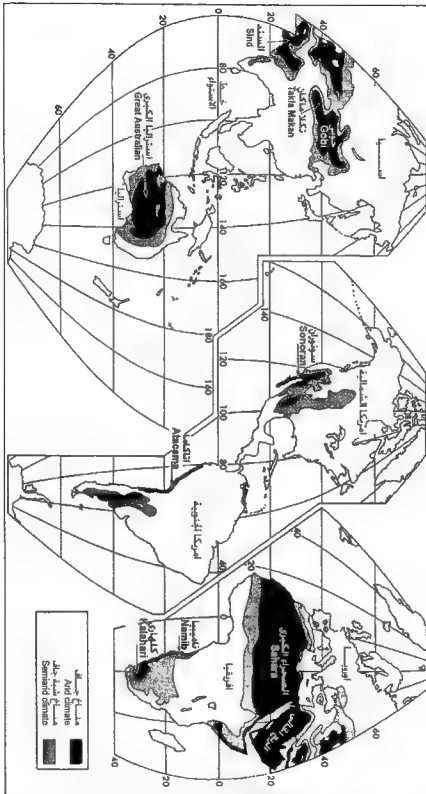
IV. التصحر

وتمثل الرياح قوة فعالة في تشكيل سطح الأرض ، خاصة في الصحارى الحارة ، رغم أنها تعتبر أقل عوامل التعرية تأثيراً في المناطق الرطبة . ويمكن أن يستمر هبوب الرياح لعدة أيام متصلة دون انقطاع تقريباً. فالرياح هي عامل التعرية الرئيسى في الصحارى. كما تعتبر عامل ترميب رئيسياً أيضاً ، حيث تقوم بنقل كميات ضخمة من الرمال والغرين والتراب لمسافات طويلة على القارات وفي المحيطات . ويستخدم الجيولوجيون مصطلح ريحي *eolian* لوصف العمليات الجيولوجية التي تقوم فيها الرياح بالدور الرئيسى ، حيث يشتق هذا المصطلح من إله الريح إليوس *Aeolus* عند اليونانيين القدامى . وتشبه الرياح المياه في قدرتها على التعرية والنقل والترسيب ، حيث تخضع حركة الغازات للقوانين نفسها التي تحكم حركة السوائل . ومع ذلك ، فهناك بعض الفروق التي تجعل قوة الرياح أقل تأثيراً من تيارات المياه .

ومستأنو في هذا الفصل عمل الرياح ، بالإضافة للصحارى الموجودة على الكرة الأرضية ، حيث ترتبط الكثير من العمليات الجيولوجية كالتهرية والنقل والترسيب في الصحارى بعمل الرياح ، علاوة على أن الصحارى تغطي معظم العالم العربى . وعلى الرغم من أن تأثير الرياح يكون أكثر أهمية في المناطق الصحراوية ، إلا أنه لا ينحصر في تلك المناطق فقط . فتؤثر الرياح على عديد من الشواطئ حيث تحمل الرياح الرمال المفككة من الشاطئ لتنقلها إلى المناطق الداخلية . وسنعرض في نهاية هذا الفصل لعملية التصحر والتي تسبب عديداً من المشكلات الاقتصادية لبعض البلاد ، خاصة في عالمنا العربى .

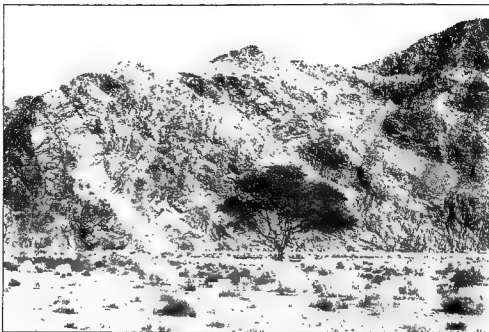
تغطى المناطق الصحراوية الحارة حوالى 42 مليون كيلومتر مربع من سطح الأرض، وهو ما يمثل مايزيد عن 30 ٪ من المساحة الكلية لسطح الأرض . وتشمل معظم هذه المناطق ، والتي تتميز بنقص المياه ، نوعين من المناخ هما المناخ الجاف *arid* والمناخ شبه الجاف *semiarid* . ويشترك المناخان في عديد من الخصائص. فالمناخ شبه الجاف يكون أعلى في نسبة الرطوبة ، كما أنه يمثل منطقة انتقالية بين المناطق الجافة والمناطق الرطبة ، ويتميز بنمو الحشائش . ويسمى الجغرافيون تلك المناطق شبه المدارية بالاستبس *steppes* أو البرارى . وتكون معظم المناطق الجافة عبارة عن صحارى أو شبه صحارى ، وتقع في المناطق المدارية وشبه المدارية بين خطى عرض 20° و 30° شمالاً وجنوباً تقريباً (شكل 1.15). وتنمو في تلك المناطق الصحراوية الجافة بعض أنواع النباتات التي تتميز بقدرتها على تحمل الجفاف وزيادة الأملاح ، كما تنمو لها جذور عميقة تمتد في التربة لتحتفظ بالماء ، وتكون غالباً متباعدة عن بعضها (شكل 2.15). وتكون أوراق هذه النباتات صغيرة جدا حتى تقلل من فقد الماء أثناء عملية التتح .

وتتميز المناطق الصحراوية الحارة بشدة تأثير الرياح، التي تكون شديدة أحيانا بما يكفى لأن تجعل حبيبات الرمل تدور في الهواء ، كما نلاحظ أثناء السفر على الطرق الصحراوية بمصر وبمنطقةتنا العربية عموماً. إلا أن تأثير الرياح يمتد أيضا إلى سائر مناطق العالم خاصة الساحلية منها . فقد تعرضت مدينة لندن في 25 يناير 1995م لعاصفة ريحية وصلت سرعتها إلى أكثر من 175 كم/ الساعة ، على الرغم من ندرة تعرض لندن لمثل تلك العواصف .



شكل (1.15): توزيع المناخات الجافة وشبه الجافة في العالم، والتي تقع بين خطي عرض 20° و 30° شمالا وجنوبا تقريبا والصحاري الكبرى المصاحبة لها. تشمل المساحات الحافة جدا في المناطق القطبية مساحات تعرف بالصحاري القطبية polar deserts.

(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).



شكل (2,15): بعض أنواع النباتات في وادي غدير بجنوب الصحراء الشرقية - مصر ، وتتميز بقدرتها على تحمل الجفاف وزيادة نسبة الأملاح ، وتكون متباعدة عن بعضها . لاحظ أن النباتات تمانى من الجفاف . (أ.د. محمود عبد الغفور ، هيئة المواد النووية).

أ - العمل الجيولوجي للرياح

لمناقشة كيف ترتبط الرياح على سطح الأرض بالحركة الدائمة للغلاف الجوى على كوكب الأرض . ويكون انسياب الهواء على سطح الأرض انسياباً مضطرباً turbulent أى فى مسارات غير منتظمة ، كما هو الحال فى انسياب الماء فى الأنهار . ويعتمد الانسياب المضطرب للسائل على ثلاثة خصائص للسائل وهى: كثافته ولزوجته وسرعته . وتسبب كثافة ولزوجة الهواء ، واللتان تكونان منخفضتان للغاية (0.001، 0.02) من كثافة ولزوجة الماء على التوالي) اضطرابه حتى عند النسيم الخفيف . ويوضح جدول (1.15) أنواع الرياح وسرعاتها وتأثيرها على سطح البحر ، كما هو متفق عليه عالمياً.

ويزداد انسياب الهواء اضطراباً كلما زادت سرعة تحركه ، كما هو الحال فى الانسياب المضطرب للماء . فيحرك النسيم اللطيف الحشائش الطويلة بوضوح ، بينما ترفع الرياح العاصفة غطاء الرأس ، وتمزج الزوينة القوية سيارة متحركة . ويؤدى الانسياب المضطرب

يتكون الغلاف الجوى من خليط من الغازات التى نطلق عليها جميعاً اسم الهواء air . أما الرياح winds فهى انسياب الهواء موازياً لسطح الكرة الأرضية دائمة الدوران . ويكون الغلاف الجوى فى حركة دائمة ، حيث نشعر بهذا عند هبوب نسمة لطيفة أو ريع قوية . وعلى الرغم من أن الرياح تحكمها كل قوانين انسياب السوائل التى تطبق على انسياب الماء فى المجارى المائية ، إلا أنه توجد بعض الاختلافات بينهما . فالرياح لا يحكمها عموماً حدود صلبة تمنع تدفق الهواء خلالها ، ما عدا سطح الأرض والوديان الضيقة ، عكس الماء المنساب فى مجارى الأنهار ، كما يتحرك الهواء فى كل الاتجاهات ، بما فى ذلك الحركة الرأسية فى الغلاف الجوى .

أ - نظام الرياح على كوكب الأرض

لكى نشرح لماذا تكون الرياح مؤثرة كعوامل جيولوجية فى بعض المناطق دون غيرها ، فإننا نحتاج

جدول (1.15): وصف أنواع الرياح وسرعاتها وتأثيرها على سطح البحر

سرعة الرياح (كم/ ساعة)	الوصف	تأثير الرياح على سطح البحر
1	هاديء	سطح مرآة
1-19	نسيم خفيف إلى لطيف	تجمع خفيف إلى أمواج صغيرة (موجبات)
20-49	نسيم متوسط إلى قوى	أمواج متوسطة إلى قوية
50-88	نوة معتدلة إلى شديدة	أمواج مرتفعة ، زيد (رغوة) ، وذاذ
89-117	نوة شديدة إلى عاصفة	أمواج شديدة الارتفاع ، بحر ساحب
117	إعصار	بحر ذولون أبيض ، زيد برغوة ورذاذ ، رؤية منخفضة

(After Press, F. and Siever, R. 1998: Understanding Earth, 2nd edition.W.H.Freeman and Company, New York).

الشمس مائلة مما يؤدي إلى انتشارها على مساحة أكبر من سطح الأرض ، كما أن طول المسافة التي تقطعها تلك الأشعة في الجو يجعل طاقتها محدودة أيضاً. ويؤدي هذا التباين في درجات الحرارة إلى أن تنتقل بعض الحرارة الزائدة عند الحزام الاستوائي الذي تحده خطوط عرض منخفضة ، إلى المناطق القطبية التي تحدها خطوط العرض العليا . وينساب الهواء البارد صوب خط الاستواء ، بينما تتحرك الرياح الساخنة صوب الأقطاب ، لتنتقل الكثير من الحرارة ، خاصة المحمولة في بخار الماء . وينعكس هذا الانتقال للطاقة غالباً في صورة كتل الهواء المتحركة على شكل أعاصير شديدة .

وعندما تصعد كتلة الهواء الساخنة وتمدد ، فإنها تصبح أقل كثافة ، وذات ضغط منخفض ، وتسبب عملية التمدد برودة الهواء ، وهي عملية أدياباتيكية *adiabatic process* ، حيث تتغير درجات الحرارة دون فقد أي حرارة . ويرجع السبب في ذلك ، إلى أن كمية الحرارة الكلية تبقى ثابتة ، إلا أنها تنتشر خلال حجم أكبر من الهواء ، ولذلك تنخفض درجة حرارتها .

أيضاً إلى تغيرات مفاجئة في سرعة واتجاه الرياح ، وقد تكون مثل هذه التغيرات قوية بدرجة تكفي لاهتزاز طائرة كبيرة . ويؤدي التغير في الإشعاع الشمسي مع تغير خط العرض وتأثير كوريوليس (انحراف اتجاه الرياح نتيجة دوران الأرض) وتوزيع القارات والمحيطات ومواقع السلاسل الجبلية إلى نشأة الرياح والتحكم في اتجاهها وأحزمتها .

1- نمط الرياح فوق سطح الكرة الأرضية

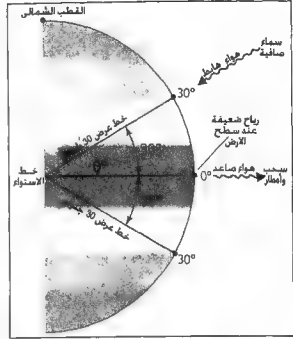
تعتبر الشمس المصدر الرئيسي لحرارة الغلاف الجوي وسطح الأرض . وتمتص كميات كبيرة من الإشعاع الشمسي عند حزام خط الاستواء المواجه للشمس ، والذي يمتد إلى خط عرض 30° شمالاً وجنوباً (خط العرض *latitude* هو المسافة شمال أو جنوب خط الاستواء مقاسة بالزاوية التي يحددها نصف قطر الكرة الأرضية مع نصف القطر الاستوائي عند أي نقطة) ، (شكل 3.15). ويقع خط الاستواء عند خط عرض 0° بينما يقع القطب الشمالي عند خط عرض 90° . وتستقبل خطوط العرض القطبية كميات قليلة جداً من الطاقة الشمسية ، حيث تكون أشعة

الضغط المنخفض بحثا عن وضع الاتزان. ولكن تكون الحركة الرأسية للهواء قليلة، عند مقارنتها بالحركة الأفقية (بمعنى نشأة الرياح). ويتأثر انسياب الهواء بدرجة كبيرة بدوران الأرض ويتأثر كوريولس، الذى سيتم مناقشته لاحقا.

2- أحزمة الرياح

يرجع السبب فى تكون أحزمة الرياح wind belts (شكل 4.15) إلى الحركة الدائمة للغلاف الجوى بسبب التغير فى الإشعاع الشمسى مع تغير خطوط العرض. فالشمس تعمل على تدفئة سطح الأرض الواقع حول خط الاستواء، حيث تكون أشعة الشمس عمودية تقريباً على سطح الأرض، بينما تعمل تلك الأشعة على تدفئة سطح الأرض بدرجة أقل عند خطوط العرض العليا والأقطاب، حيث تسقط أشعة الشمس مائلة بزاوية على سطح الأرض. وتصلد كتلة الهواء الساخن عند خط الاستواء إلى أعلى وتتمدد، وتصبح أقل كثافة من الهواء البارد عند خطوط العرض العليا والأقطاب. وتؤدى عملية التمدد إلى برودة كتلة الهواء، وهى عملية أدياباتية كما ذكرنا سابقا. ويسقط الهواء محتواه من الرطوبة المتكثفة على هيئة أمطار فوق المنطقة الاستوائية.

ويتنشر الهواء البارد الجاف الموجود فى طبقات الجو العليا شمالا وجنوبا، ليصبح أكثر انضغاطا، حيث ينساب ناحية خطوط العرض الأعلى ذات المساحات البينية الأصغر. وعند خط عرض 30° شمالا وجنوبا تقريبا، يهبط الهواء الأكثر كثافة عند نطاق الضغط العالى شبه المدارى semitropical high pressure zone، مما يؤدى إلى ارتفاع حرارة الهواء أدياباتيا أثناء هبوطه وعودته إلى سطح الأرض ككتلة هواء جافة دافئة. وينساب بعض الهواء الهابط ناحية القطبين كرياح تهب من الغرب، ولذلك تعرف بالرياح الغربية

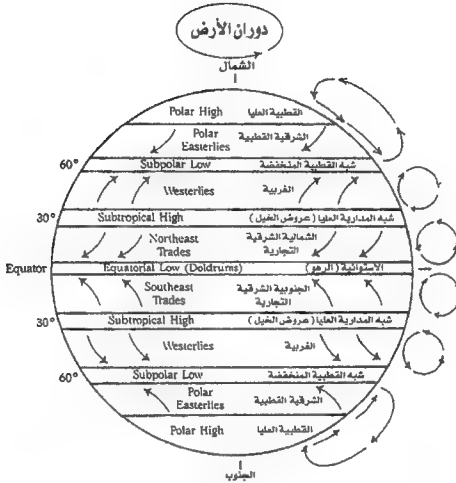


شكل (3.15): خط العرض latitude هو المسافة شمال وجنوب خط الاستواء مقاسة بالزاوية التى يحددها نصف قطر الكرة الأرضية مع نصف القطر الاستوائى. وعند خط الاستواء فإن السطح المعرض للرياح يكون صلبا، ويرتفع الهواء مكونا سحباً تسقط كأمتار حينها تبرد. وعند خط عرض 30° شمالا وجنوبا يهبط الهواء البارد ويصبح دافئا، ويمتص الرطوبة وتصبح السماء صافية. وتؤدى هاتان الحركتان للهواء إلى دوران الهواء أفقيا بين خط الاستواء وخطوط العرض الشمالية والجنوبية.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

وعندما يهبط كتلة الهواء البارد المرتفعة وتنضغط، فإنها تصبح أكثر كثافة وترتفع درجة حرارتها أثناء الهبوط. ولا تتغير كمية الحرارة فى كتلة الهواء الهابطة، ولكن لأنها تنضغط فى حجم أصغر، فإن درجة الحرارة ترتفع، وهذه أيضا عملية أدياباتية. وهكذا تؤدى التأثيرات الأدياباتية إلى تبريد كتل الهواء أثناء تمددها، وارتفاع درجة حرارتها أثناء ضغطها.

ويستجيب الغلاف الجوى بسرعة للإشعاع الشمسى، حيث يصعد الهواء الدافئ ويهبط الهواء البارد. وتنساب كتلة الهواء من الضغط العالى إلى



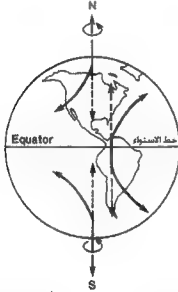
شكل (4.15): نمط نموذجي للرياح فوق سطح الكرة الأرضية دون تأثير للكنتل الأرضية أو ميل محور دوران الأرض .
(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

يكون من النادر تساقط الأمطار في تلك المناطق . وتكون الرياح الدافئة الجافة في الأحزمة شبه المدارية subtropical belts بين خطى عرض 30° و 20° شمالا وجنوبا ، مسئولة عن وجود عديد من الصحارى الكبرى في العالم ، مثل الصحراء الكبرى في شمال أفريقيا ، وكلهاري في أفريقيا ، وسونوران في غرب أمريكا الشمالية وإستاراليا الكبرى والجزيرة العربية .

أو غريبات westerlies ، بينما ينساب جزء من الهواء ناحية خط الاستواء كرياح تجارية تهب من الشرق (شكل 4.15). وقد يطلق مصطلح الرياح التجارية على تلك الرياح لدورها الهام في دفع السفن التجارية عبر المحيطات المدارية في الأوقات التي كانت فيها الرياح هي المصدر الرئيسي للقوى المحركة .

وتكون نسبة الرطوبة منخفضة في الهواء الدافئ المناسب من النطاق شبه المداري كرياح تجارية ، ولذلك

ولا يتأثر بدوران الأرض بعجلة كوريولي . ونظرا لغياب هذه العجلة الزاوية أو عدم كفايتها ، فيحدث انحراف في مسار الجسم المتحرك إلى يمين اتجاه الحركة في نصف الكرة الأرضية الشمالي ، وإلى يسار اتجاه الحركة في نصف الكرة الأرضية الجنوبي (شكل 5.15)، والذي يسمى كما سبق أن ذكرنا بتأثير كوريولي .



شكل (5.15): تأثير كوريولي Coriolis's effect، والذي يشرح كيف يحدث انحراف في مسار كتل الهواء أو مياه المحيطات المتحركة ، إلى يمين اتجاه الحركة في نصف الكرة الشمالي ، وإلى يسار اتجاه الحركة في نصف الكرة الأرضية الجنوبي .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

ويؤدي تأثير كوريولي على دوران الغلاف الجوي إلى انحراف كل من انسيابات الهواء الشمالية والجنوبية والباردة والساخنة . فعلى سبيل المثال ، عند ما تهب رياح سطحية ناحية الجنوب في الحزام الاستوائي الساخن في نصف الكرة الشمالي ، فإن الرياح تنحرف إلى اليمين ، وتهب حيثتد من الشمال الشرقي بدلا من الشمال . وهذه هي الرياح التجارية الشمالية . وبالمثل ، فإن الرياح الغربية في نصف الكرة الشمالي ، هي في الأصل رياح متجهة ناحية الشمال ، وانحرفت ناحية

وينساب الهواء البارد فوق الأرض من كلا القطبين (شكل 4.15). وعندما تنساب كتل الهواء من الشرق ناحية خط الاستواء (الرياح الشرقية القطبية) ، فإنها تنساب عبر مساحات أكبر بين خطوط العرض ، وتصطدم عند خطي عرض 60° شمالا وجنوبا تقريبا بكتل الرياح الغربية ، وتصدع الكتلتان عند النطاق شبه القطبي المنخفض low subpolar .

ويتغير نمط الرياح فوق سطح الأرض نتيجة وجود الكتل القارية، والتي تشمل سلاسل الجبال، بالإضافة إلى التسخين والتبريد الموسمي ، واللذين يؤثران على نصف الكرة الشمالي والجنوبي .

3 - تأثير كوريولي

يتأثر النمط البسيط لدوران الهواء بين خط الاستواء والأقطاب بدوران الكرة الأرضية، مما يسبب انحراف أى جسم متحرك (تيار هواء أو ماء) إلى يمين اتجاه الحركة في نصف الكرة الأرضية الشمالي وإلى يسار اتجاه الحركة في نصف الكرة الجنوبي . ويسمى هذا التأثير على اتجاه الهواء فوق سطح الأرض تأثير كوريولي Coriolis effect ، نسبة إلى مكتشفه عالم الرياضيات الفرنسي جاسبار كوريولي Gaspard Coriolis في القرن التاسع عشر .

ويتغير تأثير كوريولي بتغير خط العرض وسرعة الجسم المتحرك . ويرجع تأثير خط العرض إلى تغير السرعة الزاوية angular velocity ، وهى السرعة الناتجة عن دوران الأرض ، والتي تكون أقل ما يمكن عند خط الاستواء وأكبر ما يمكن عند الأقطاب . وبذلك يكون تأثير كوريولي أقصى ما يمكن عند الأقطاب ، ويصل إلى الصفر عند خط الاستواء .

وتسمى العجلة الزاوية angular acceleration التى يحتاجها جسم متحرك لكى يبقى فى مساره

أجزاء من الصحراء جنوب غرب الولايات المتحدة في نيفادا وشمال أريزونا ، والتي تقع في ظل المطر لسلسلة جبال سيرا نيفادا شرق كاليفورنيا وصحراء وسط آسيا.

ب- حركة الرواسب بالرياح

تحدث الأعاصير والتيفونات (الأعاصير المدارية) typhoons دمارا هائلا بسبب سرعة الرياح التي تصل عندئذ إلى حوالي 120 كم/ الساعة ، وقد تزيد لتصل إلى 500 كم/ الساعة. وتكون قوة الرياح كبيرة لدرجة أنها تقطع الأشجار من جذورها وتهدم المنازل ، وتقذف الأجسام الكبيرة الحجم إلى مسافات بعيدة . ولحسن الحظ ، فإن رياح الأعاصير استثنائية ، ولكنها على الرغم من خطورتها فإنها تقدم صورة لقوة الرياح كعامل جيولوجي .

ولا يستطيع الهواء أن ينقل حبيبات كبيرة مثل تلك التي ينقلها الماء عند السرعة نفسها، نظرا لأن كثافة الهواء عند مستوى سطح البحر أقل بكثير جدا من كثافة الماء كما ذكرنا . ولكن عندما تزيد سرعة الرياح عن 300

اليمين وأصبحت بذلك تهب من الجنوب الغربي . أما بالقرب من خط الاستواء ، فإن الهواء يصعد لأعلى ، وبذلك تكون هناك رياح قليلة عند سطح الأرض ويبرد الهواء أثناء صعوده ، مما يتسبب في تواجد السحب والأمطار الغزيرة عند المناطق الاستوائية .

4 - تأثير السلاسل الجبلية

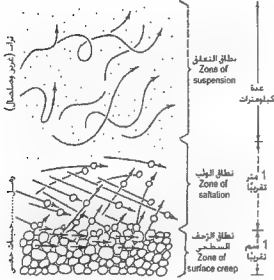
بالإضافة إلى المناطق التي تقع فيها الصحاري بين خطي عرض 20° و 30° شمالا وجنوبا تقريبا ، فإن بعض الصحاري الأخرى تقع خلف سلاسل الجبال العالية (شكل 6.15)، والتي تعترض الهواء المحمل بالرطوبة . وعندما يجبر الهواء على أن يرتفع فوق سلسلة الجبال ، فإنه يتمدد ويبرد ويسقط حمولته من الرطوبة على هيئة أمطار على جانب الجبال المواجه للرياح . ويتم هنا أيضا تسخين الهواء الهابط بالضغط . ويؤدي الهواء الجاف الذي يصل إلى الجانب المداير lee side لسلسلة الجبال إلى نشأة مناخ جاف فوق المنطقة خلف سلسلة الجبال ، حيث تعرف تلك المنطقة بـصحراء ظل المطر rainshadow desert. ومن الأمثلة الجيدة على وجود مناطق جافة في ظل المطر



شكل (6.15) تقع بعض الصحاري عند خطوط العرض الوسطى خلف السلاسل الجبلية العالية ، وتعرف بـصحاري ظل المطر rainshadow deserts . فعندما يقابل الهواء المتحرك حاجزا جبليا ، فإنه يجبر على أن يرتفع لأعلى ويتساقط المطر غالبا على الجانب المواجه للرياح windward side . ويكون الهواء الهابط على الجانب المداير للرياح leeward side أكثر جفافا ، وتعرف تلك المنطقة بـصحراء ظل المطر.

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition, Macmillan Publishing Company, New York).

واحد كتلك التى تنقلها رياح تهب بسرعة 29 كم/ الساعة فى ثلاثة أسابيع .



شكل (7.15): طريقة نقل الراسب بالرياح . تعرف حركة درجة حبيبات الرمل للأمام بالزحف السطحي surface creep . وترتفع حبيبات الرمل فى الهواء عندما تزداد سرعة الرياح ، وتنقل الحبيبات فى مسارات مقوسة تهبط بعد مسافة قصيرة فى اتجاه الريح ، وتعرف تلك الطريقة بالوثب saltation . كما ترتفع الحبيبات الأدنى حجما كالغرين silt والصلصال clay فى الهواء حيث تبقى معلقة لساعات طويلة .

(After Fritz, W. J. and Moore, J. N., 1988: Basics of Physical Stratigraphy and Sedimentology. John Wiley and Sons, Inc., New York).

فإذا كانت الرياح قوية بدرجة كافية ، فإنها تبدأ فى درجة حبيبات الرمل على سطح الأرض حيث تصطدم بحبيبة أخرى وتصطدم بها لتطير فى الهواء . وعندما تهبط الحبيبة الثانية إلى الأرض فإنها تصطدم بحبيبات أخرى وتقذف بها لتسبب فى الهواء . ويجتوى الهواء القريب من الأرض على كمية كبيرة من حبيبات الرمل الوائبة ، والتى تتحرك كلها فى اتجاه الريح فى مسارات على هيئة أقواس تشبه حركة كرات البنج بونج فوق منضدة اللعب (شكل 18.15) . وعموما لا يزيد الارتفاع الذى تصل إليه حبيبات الرمل عن متر

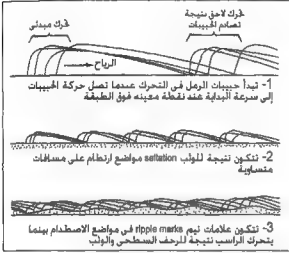
كم/ الساعة ، فإنها تستطيع حمل حبيبات من الصخر يصل قطرها إلى عدة سنتيمترات إلى ارتفاعات قد تصل إلى متر أو أكثر . ولكن نادراً ما تزيد سرعة الرياح فى معظم المناطق عن 50 كم/ الساعة . وتستطيع تلك الرياح القوية أن تحمل حبيبات الرمل التى تتعلق فى الهواء ، بينما تهبط الحبيبات الأكبر حجماً بسرعة ولا تبقى معلقة فى الهواء . وعندما تكون سرعة الهواء أقل ، تنتقل حبيبات الرمل بالقرب من سطح الأرض ، بينما يتحرك التراب dust فقط عالقاً فى الهواء .

1 - نقل الرمال بالرياح

إذا هبت الرياح على طبقة من الرمل ، فإن حبيبات الرمل تبدأ فى التحرك عندما تكون سرعة الرياح أقل من 16 كم/ الساعة . وتسمى حركة درجة rolling حبيبات الرمل للأمام بالزحف السطحي surface creep (شكل 7.15) . وترتفع حبيبات الرمل فى الهواء عندما تزداد سرعة الرياح ، حيث تنتقل حبيبات الرمل فى مسارات مقوسة لتترسب بعد مسافة قصيرة فى اتجاه الرياح ، وهذه هى عملية الوثب نفسها saltation التى ذكرت فى المجارى المائية ، حيث تتحرك حبيبات الرمل وتسير فى مسارات مقوسة أيضاً بالقرب من قاع النهر .

- الوثب: ينقل مايقرب من 75٪ من الرمال فى المناطق المغطاة بالكثبان الرملية بالوثب saltation . وتدل قياسات معدل تحرك الرمال فى صحارى منطقة الشرق الأوسط على زيادة سرعة حركة الرمال مع زيادة سرعة الرياح . فقد تستطيع رياح قوية تهب بسرعة حوالى 58 كم/ الساعة نقل كمية من الرمال فى يوم

sand ripples . وتميل موجيات الرمل إلى الاصطفاف في نمط منتظم ، حيث تكون قمم هذه الموجيات عمودية على اتجاه الرياح (شكل 9.15 ب) . وتختفى الموجيات عند هبوب رياح قوية ، حيث تتحرك كل الحبيبات وتقل عملية الفرز .



ب

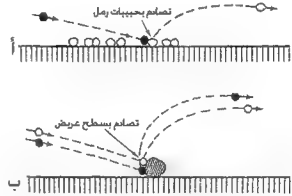
شكل (9.15): نيم الرمال sand ripples

أ. تكوين نيم الرمال (موجيات الرمال) بالرياح

(After Fritz, W. J. and Moore, J. N., 1988: Basics of Physical Stratigraphy and Sedimentology. John Wiley and Sons, Inc., New York).

ب. نيم الرمال (موجيات الرمال) sand ripples ، حيث نصطف تلك الموجيات في نمط منتظم ، وتكون قممها عمودية على اتجاه الرياح ، طريق قطف - القصير - الصحراء الشرقية .

واحد حتى في الرياح القوية . وقد تصطدم حبيبات الرمل بحبيبات حصى أو أى سطح عريض لتتب لأعلى بسرعة عالية ، وإلى ارتفاعات أكبر (شكل 8.15 ب) .



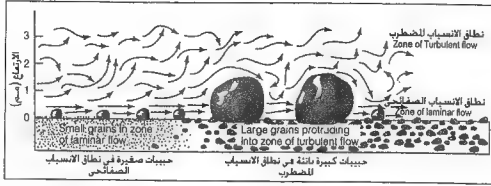
شكل (8.15): تحرك الرمال بالولب saltation

أ) تسبب الرياح القوية تحرك الرمال بالولب ، حيث تصطدم بعض حبيبات الرمل والتي تتب بدورها وتتناثر في الهواء فتحملها الرياح ، بينما تعمل الجاذبية الأرضية على إعادتها إلى سطح الأرض تصطدم بحبيبات أخرى ، وتكرر العملية .
ب) تصطدم حبيبات الرمل بحبيبات الحصى أو أى سطح هريضة وتتب لأعلى بسرعة عالية وإلى ارتفاع أكبر ، وتعتمد زاوية الصعود على درجة ميل سطح الاصطدام .

(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

- نيم الرمال (موجيات الرمال): تكون تجمعات

الرمل جيدة الفرز التي تتراكم على سطح الأرض غير ثابتة ، حتى تحت تأثير الرياح اللطيفة . وعندما تهب الرياح على هذا التجمع الرمل ، فإن حبيبات الرمل الأصغر تتحرك بالولب ، بينما تبقى الحبيبات الأكبر حجما مكانها (شكل 19.15 أ) . وعندما تصطدم الحبيبات المتحركة الأدق حجما بسطح الأرض ، فإنها تحرك حبيبات دقيقة إضافية ، ويتكون تجمع آخر من الحبيبات الخشنة ، بينما تتحرك الحبيبات الدقيقة إلى الأمام ، وتكون الحبيبات الخشنة مجموعة من المرتفعات الطولية الصغيرة تسمى نيم الرمال (موجيات الرمال)



شكل (10.15): تتواجد حبيبات الرمل الناعم والغرين عند سطح الأرض في نطاق الانسياب الصفائحي للهواء zone of laminar flow ، والذي يقل سمكه عن 0.5 مم ، حيث تكون سرعة الرياح بطيئة للغاية . ونتيجة لذلك فإنه من الصعب أن تزيح تلك الرياح تلك الحبيبات الصغيرة وتعريها . وعندما تنتقل تلك الحبيبات أكثر في نطاق يتميز بوجود هواء ذي سرعة أكبر ومضطرب ، فإنها تبدأ أن تتحرك بسهولة. (After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

2 - نقل التراب بالرياح

الدوامات المضطربة المتصاعدة . وعلى العكس من ذلك، فإن حبيبات التراب تكون صغيرة الحجم ومترتبة بإحكام ، لدرجة أنها تكون سطحا ناعما جدا ، ولا تنتقل حبيباته فوق طبقة الهواء الساكن . ولا يمكن أن يتحرك هذا التراب حتى إذا هبت عليه رياح قوية ، إلا أنه يمكن تحريكه فقط بأن تصدم به حبيبات رمل وثابة أو أى أجسام أخرى .

وعندما تصعد حبيبات التراب في الهواء ، فإنها تكون الحمولة المعلقة suspended load للرياح . وتقذف الدوامات حبيبات التراب إلى الأمام باستمرار، بينما تعمل الجاذبية الأرضية على جذبها ناحية الأرض (شكل 7.15) . وفي معظم الأحيان ، يترسب الراسب المعلق بالقرب من مكان نشأته ، إلا أن الرياح القوية المصاحبة للعواصف الترابية القوية تحمل التراب الدقيق جدا إلى طبقات الجو العليا ، حيث ينتقل لآلاف الكيلومترات.

وتعتبر العواصف الترابية dust storms من العوامل الرئيسية في نقل كميات كبيرة من التراب ، وهي تنتشر في المناطق المتسعة الجافة وشبه الجافة ، مثل منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا ووسط استراليا

تنتقل حبيبات الرمل على سطح الأرض ببطء ، وترسب بسرعة عندما تنخفض سرعة الرياح ، بينما تنتقل حبيبات التراب dust الدقيقة (راسب في حجم حبيبات الغرين والصلصال) بسرعة أكبر ولسافات أطول بكثير ، قبل أن تهبط إلى سطح الأرض . وتصل كمية التراب المتكوّنة سنويا بهذه الطريقة على مستوى العالم إلى حوالي 5 بلايين طن . ومن المناطق التي تتكون فيها كميات كبيرة من التراب طبقات البحيرات والمجاري المائية الجافة والمراوح الطميية وسهول المجارى المائية الناتجة من المائج والمناطق التي تغطيها رواسب من التراب ، والتي فقدت غطاءها النباتي بسبب تغيرات مناخية أو نشاط بشري .

وتقل سرعة الهواء المتحرك بالقرب من سطح الأرض بدرجة كبيرة نتيجة الاحتكاك ، حيث تكون سرعة الهواء منخفضة للغاية . وتوجد طبقة من الهواء الساكن يقل ارتفاعها عن 0.5 مم فوق سطح الأرض مباشرة (شكل 10.15) . وعندما تنتقل حبيبات الرمل فوق طبقة الهواء الساكن هذه فإنها تطير عاليا بفعل

أو يطير مع الريح) فهي اكتساح الهواء للأجزاء الجافة المفككة من القنات الصخرى والرمل والتراب ونقلها من مكان إلى آخر ، والبرى (السحج) abrasion هو تآكل الصخر ميكانيكياً نتيجة احتكاكه واصطدامه بحبيبات راسب تحملها الرياح . وتسمى الطريقة الثانية بسفع الرمال sandblasting ، وتحدث عندما تكون الرياح المدفوعة في مواجهة سطح الصخر المكشوف محملة بالرمل . ونعرض هنا لوصف كل من هاتين الطريقتين :

1 - التذرية

تؤدي عملية التذرية إلى نقل حبيبات التراب والغرين والرمل الجاف والمفكك من مكان إلى آخر ، وبالتالي انخفاض سطح الأرض بشكل تدريجي في مناطق التذرية وارتفاعها في مناطق أخرى . ويمكن أن تؤدي التذرية إلى تكون منخفضات ضحلة أو أحواض تعرف بأحواض التذرية deflation basins أو المذريات blowouts (مفردها مذرى) ، في الصحارى والسهول الجافة أو الطبقات الجافة الموجودة في البحيرات وسهول فيضان الأنهار . ويعطل وجود النباتات عملية التذرية في المناطق الجافة وشبه الجافة ، حيث تعمل جذور النباتات على التحام التربة ببعضها ، بينما تصد سيقان وأوراق النباتات الرياح ، وتعمل على حماية سطح الأرض .

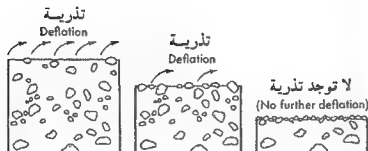
ويتراوح قطر حوض التذرية بين عدة أمتار (من 3 إلى 6 أمتار) إلى كيلومتر تقريباً ، كما قد يتراوح عمقه بين عدة أمتار و50 متراً أو أكثر . ويرى بعض الجيولوجيين أن منخفض القطارة في الصحراء الغربية بمصر ، وهو منخفض هائل يصل عمقه إلى حوالى 134 متراً تحت سطح البحر ، قد ساهمت التذرية الشديدة في تكوينه ، بالإضافة إلى العوامل التكتونية . وعموماً ، فإن المستوى الذى يصل إليه سطح التذرية يكون محكوماً بمنسوب الماء الجوفى .

وغرب الصين وأواسط آسيا . وترسب التراب عندما (1) تنخفض سرعة الرياح ويقل اضطراب الهواء بحيث لا تبقى الحبيبات معلقة في الهواء ، (2) تصادم الحبيبات مع أسطح خشنة أو رطبة تصطاد تلك الحبيبات ، أو أسطح بها شحنات كهربية ضعيفة تجذبها ، (3) تجمع الحبيبات لتكون تجمعات aggregates حبيبية ترسب بسبب زيادة كتلتها ، (4) غسل الحبيبات من الهواء بمياه الأمطار .

ويعمل الغطاء النباتى كمصيدة لحبيبات التراب الهابطة نتيجة انخفاض سرعة الرياح فوق المناطق المغطاء بالنباتات . وتكون الغابات أشد تأثيراً كمصيدة للتراب عن النباتات القصيرة الساق ، حيث تعمل الأشجار على خفض سرعة الرياح في النطاق الحرج فوق سطح الأرض . كما يحدث الترسب أيضاً عندما يوجد عائق طوبوغرافى يسبب تشعب الهواء وانحراف مساره ، حيث يؤدي ذلك إلى انخفاض سرعة الرياح خلف العوائق . وذلك يفسر لماذا تكون رواسب التراب سميكة عموماً على الجانب المداير lee side للعائق (الجانب البعيد عن الريح) ، بينما يكون الترسب قليلاً أو منعدماً في الجانب المواجه للريح windward side (الجانب الذى تهب منه الريح) . وترسب أولاً حبيبات التراب الخشنة ومتوسطة الحجم المحمولة على ارتفاعات منخفضة ، بينما تحمل الحبيبات الأذى لأعلى في الغلاف الجوى ، ويمكن أن تبقى عالقة لفترات طويلة .

ج - التعرية بالرياح

تعتبر الرياح القوية والمستمرة من عوامل التعرية المهمة ، حين تكون الأرض من تحتها جافة ولا تحتوى على غطاء نباتى . ويقوم الهواء المنساب والمحمل بالرواسب بتعرية الأرض بطريقتين هما التذرية (التجوية) والسحج (البرى) . أما التذرية (التجوية) deflation (من كلمة اللاتينية deflare بمعنى ينفخ



ب

شكل (11.15): عملية التذرية (التخوية) Deflation .

(أ) مراحل تكون الرصيف الصحراوي desert pavement نتيجة تذرية ورواسب ردينة الغرز

(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

(ب) رصيف صحراوي مكون من غطاء مستمر من الأحجار فوق أرضية وادى يعمل كدرع يحمي التربة والرواسب أسفله من أى تعرية جديدة، جبل القطراني - الصحراء الغربية - مصر . (أ.د. ممدوح عبد الغفور، هيئة المواد النووية).

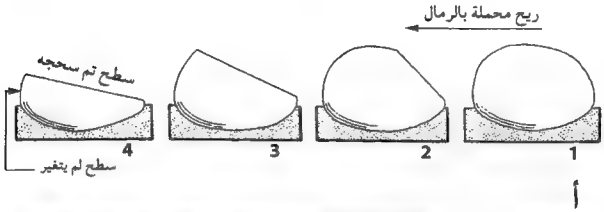
الصحراوية في منطقتنا العربية تأثير الرياح المحملة بالرمال خاصة على زجاج السيارات الأمامي في الرحلات الطويلة . وتشبه عملية سفح الرمال عملية تنظيف المباني الأثرية والآثار باستخدام هواء مندفع تحت ضغط عالٍ ومحمل بالرمال ، والتي تشمل تآكل سطح صلد نتيجة اصطدام حبيبات مندفعة بسرعة عالية . ويحدث السفح بالرمال أساسا بالقرب من سطح الأرض ، حيث تحمل معظم حبيبات الرمل ، ويؤدي السفح بالرمال إلى تعرية ونعومة مكاشف الصخر والجلاميد والحصى والرمال وتحشيش (صفرة) أسطح القوارير (الأواني) الزجاجية.

والوجهي بحيات ventifacts هي حصى تواجه للرياح ، تكونت بها عدة أسطح منحنية أو مستوية تقريباً ، تتقابل عند حروف حادة . وقد تكون كل وجه أو سطح صغير نتيجة سفح الرمال لجانب الحصى المواجه للرياح windward side (شكل 12.15) .

وعندما تزيل التذرية الحبيبات الدقيقة المكونة من الرمال والغرين والصلصال من التربة والرواسب ، فإن السطح المتبقى يكون مغطى بحصى كبير الحجم يصعب نقله بالرياح . وتعمل التذرية المتوالية للمواد الدقيقة على مدى آلاف السنين على بقاء الحصى وتتكون طبقة أو غطاء مستمر من الأحجار يعرف بالرصيف الصحراوي desert pavement ، حيث يعمل هذا السطح كدرع يحمي التربة والرواسب أسفله من أى عملية تعرية جديدة (شكل 11.15). ويعتقد بعض الجيولوجيين أن الرصيف الصحراوي قد يتكون بانسياب المياه من الأمطار الغزيرة وليس بالتذرية ، كما قد يتكون بأسباب أخرى .

2 - سفح الرمال

يعرف سفح الرمال sandblasting بأنه عملية تعرية الصخر بفعل الرياح المحملة بالرمال عندما تضرب وجه الصخر . ويلاحظ المسافرون على الطرق



ب

شكل (12.15): وجهريجات ventifacts

(أ) مراحل تكون وجهريجة ventifact نتيجة سفع الرمال sandblasting في جانب الحصى المواجه للرياح، حيث تصبح الحصاة pebble وجهريجة بين المرحلتين الثالثة والرابعة.

(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

(ب) وجهريجة، منطقة أبو رواش - شمال القاهرة - مصر. (مجموعة أ. د. سليمان محمود سليمان، قسم الجيولوجيا - جامعة عين شمس).

الكيلومترات ، وارتفاعه إلى حوالى 100 متر . وتميز الiardanج بأن لها عدة قمم ، وأنها منحوتة من صخور رسوبية متراصة صلبة أو صخور متبلورة (نارية ومتحولة) أو في رواسب بحيرات قديمة غير متراكمة نسبيا (شكل 13.15) نتيجة للسحب (البرى) بالغبار والغرين ، وتكون كلها معرضة للتعرية الشديدة.

د- الترسيب بالرياح (الرواسب الريحية)

عندما تنخفض سرعة الرياح بدرجة كبيرة فإنها لا تستطيع نقل حمولتها من الرمال والغرين والتراب ، وترسب أولا المواد الخشنة لتكوّن الكثبان الرملية مختلفة الأشكال ، وتتراوح في الحجم بين هضاب صغيرة مدورة knolls منخفضة وتلال ضخمة قد يصل ارتفاعها إلى أكثر من 100 متر . وتساقط حبيبات الغرين والتراب الأدق حجبا لتكون غطاء منتظما تقريبا من الغرين والصلصال . ويقوم الجيولوجيون بدراسة هذه العمليات الترسيبية وربطها بخواص الرواسب ، خاصة التطبيق والنسيج ،

وتؤدى العواصف أحيانا إلى دوران أو تقليب الحصى ، مما يعرض جانب جديد منها لسفع الرمال . ويمكن استخدام الوجيهيمات لتحديد وقياس اتجاه الرياح السائدة ، نظرا لأن الأسطح المستوية للمحصى تتكون في مواجهة الرياح كما ذكرنا .

والiardanج (حيد ريحي) yardang (مشتقة من كلمة تركية بمعنى منحدر حاد أو جرف) وتعرف أيضا بالضلوع الصحراوية هى عبارة عن حيود مستطيلة ومتوازية تفصلها أخاديد أو عمات ضيقة تكونت نتيجة التعرية بالرياح ، وتصطف موازية لاتجاه الرياح السائدة . ويكون لبعض الiardanج شكل يشبه جسم سفينة مقلوبة . ويعتبر الiardanج أحد المعالم الشائعة المتكونة بفعل الرياح في الصحارى الحارة ، مثل الصحراء الغربية المصرية . وتتواجد الiardanج عادة في مجموعات (شكل 13.15) . ويكون ارتفاع هذه الحيود أقل من 15 مترا وطولها 100 متر أو أكثر ، ولكن قد يصل طول الiardanج الواحد المفرد إلى عشرات



شكل (13.15): حقل ياردنج yardangs بمنطقة واحة الغرارة ، تحت في صخور البليبا الصحراء الغربية - مصر

ويؤثر هذا التراكم للرمال بدوره على انسياب الهواء ،
ويصبح هذا التراكم نفسه عائقا ، ويستمر هذا التراكم
في النمو في الجانب المداير للعائق حتى يصبح كثيبا .

شكل وحجم الكثيب : يكون الشكل النموذجي
للكثيب الرمل غير متماثل ، حيث يكون الانحدار
لطيفا في الجانب المواجه للريح windward side
ولاتزيد زاوية الانحدار فيه عن 12° ، بينما يكون
الوجه المداير lee face للريح حاد الانحدار . وتكون
زاوية استقرار الحبيبات في حدود 33° إلى 34° تقريباً
(زاوية الاستقرار angle of repose هي أقصى
زاوية يمكن أن يستقر عندها الراسب المتراكم قبل أن
ينهار) . وعندما ينمو كثيب الرمل بسبب وجود عائق
يسبب انفصال الريح وتكون ظل الريح ، فإن كل
الركام يبدأ في الهجرة في اتجاه الريح نتيجة لحركة
حبيبات الرمل . وتتحرك حبيبات الرمل بالوثب على
مستوى الانحدار المواجه للريح ، وهو انحدار تكون
زاوية ميله صغيرة حتى قمة الكثيب ، لتسقط في ظل
الريح windshadow على الانحدار المداير للريح
(شكل 14.15) (ظل الريح هو المنطقة خلف عائق ما
حيث تنخفض سرعة الريح وتكون حركة الهواء غير
قادرة على تحريك المواد) . وتبنى هذه الحبيبات تدريجيا
تراكما انحداره حاد وغير مستقر على الجانب العلوي
من الوجه المداير للريح . وتتكرر دوريا عملية البناء
غير المستقر حيث ينزلق الرمل بسرعة على الوجه المداير
للريح . ولذلك يعرف أيضا الوجه المداير لكثيب نشط
بوجه الانزلاق (مسقط الرمل) slip face .

ويؤدي الانزلاق المستمر والمتتابع لحبيبات الرمل إلى
أن تحافظ أوجه الانهيار على زاوية الاستقرار ثابتة ،
بالإضافة إلى تكون تطبق متقاطع cross strata ،
وهو سمة مميزة للكثبان التي تكونت نتيجة تغيرات في

لاستنتاج المناخات وأنماط الرياح القديمة . ونعرض
فيما يلي الأنواع المختلفة للرواسب التي تكونها الرياح .

1 - الكثبان الرملية

الكثيب الرمل sand dune هو تراكم من رمل
سائب يأخذ شكل مرتفع أو تل ، ترسب وتشكل
بالرياح . وتغير الكثبان النشطة شكلها باستمرار بتغير
اتجاه الريح . وتتكون الكثبان الرملية عندما يكون هناك
مصدر للرمال مثل صخور الجرانيت أو صخور الحجر
الرمل التي يتم تجويتها بسهولة ، بحيث يسهل انفصال
حبيبات الرمل منها ، أو شاطئ يوجد بالقرب منه
مصب نهر قريب . ويمنع وجود غطاء نباتي تحرك
الكثبان الرملية ، حيث تكون حيثشذ غير نشطة
ومستقرة ، أو حينئذ تتغير اتجاهات الريح أو مصادر
الإمداد بالرمل . ويلخص جدول (2.15) أنواع
الكثبان الرملية المهمة ، والتي صُنفت اعتياداً على كمية
الرمال المتاحة وتغير قوة واتجاه الريح ، وكذلك كمية
ونوعية الغطاء النباتي .

وتتكون حبيبات رمل الكثيب الرمل عموما من
معدن الكوارتز ، وهو معدن صلب يتحلل كيميائياً
بصعوبة . ويتكون الكثيب بسبب وجود أية عوائق غير
منتظمة على سطح الأرض تسبب انحراف انسياب
الهواء . وتغير سرعة الرياح عموما على ارتفاع متر أو
مترين من سطح الأرض مع أي تغيرات طفيفة في
شكل سطح الأرض . فعندما تقابل الرياح أي عائق
صغير، فإنها تندفع فوقه وحوله وتترك منطقة بعد
العائق مباشرة تكون سرعة الهواء فيها أبداً ما يكون ،
حيث تنخفض سرعة الرياح المحملة بحبيبات الرمل في
هذه المنطقة والتي تعرف بنطاق ظل الريح
windshadow zone ، وتبدأ الرمال في التراكم .

مرحلة (أ)

تعمل الرياح وتكون مبطنة من المنطقة بعد العائق مباشرة

عائق من صخر

مرحلة (ب)

تبدأ رواسب الرمل في الترسب خلف العائق في بؤشة من الهواء تكونت نتيجة وجود العائق

منطقة ظل الرياح / Wind shadow zone

مرحلة (ج)

تتسارع الرومال في التراكم والنمو نتيجة اهتزال حبيبات الرمل على وجه الانزلاق

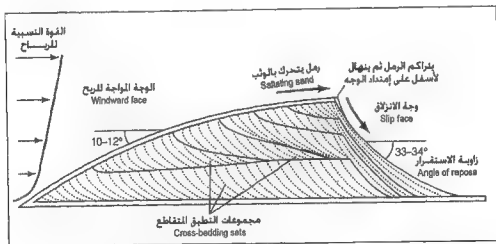
الرواب / Saltation

وجه الانزلاق / Slip face

زاوية الانحدار / Angle of repose

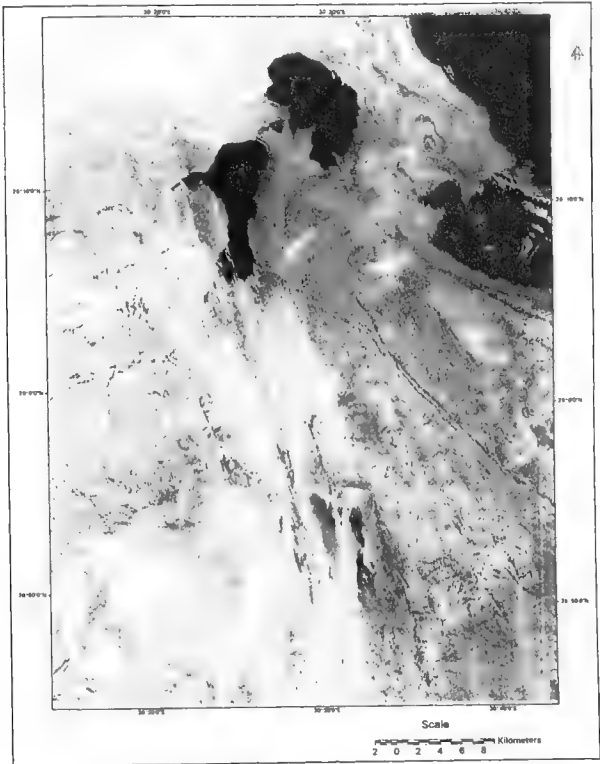
(After Fritz, W. J. and Moore, J. N., 1988: Basics of Physical Stratigraphy and Sedimentology. John Wiley and Sons, Inc., New York).

سرعة واتجاه الرياح (شكل 15.15). وعلى الرغم من أن الكثبان الرملية تتراكم وتتداخل مع بعضها أحيانا ،



(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: *The Dynamic Earth*, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

مكسي). ويوضح جدول (2.15) تلك الأنواع • كثبان البرخان : يأخذ كثيب البرخان **barchan** لمختلفة من الكثبان الرملية .
dune شكلاً هلالياً ولذلك تعرف أيضاً بالكثبان



شكل (16.15): صورة فضائية لكثبان طولية (سيقية) في الصحراء الغربية - مصر .

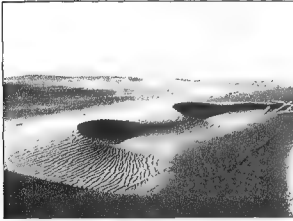
الحافات الرملية ، وهى عبارة عن حيود أو تلال طولية مستقيمة أو متعرجة قليلا ، وتكون موازية تقريباً للاتجاه العام للرياح السائدة . وقد تصل هذه الكثبان إلى ارتفاعات تصل إلى 100 متر ، وقد تمتد لعدة كيلومترات . ومازال تفسير أصل الكثبان الطولية موضع نقاش حتى الآن . ولكن يعتقد معظم الجيولوجيين أن تلك الكثبان تتكون نتيجة هبوب الرياح من اتجاهات ثابتة تحدد الامتداد الطولى للكثيب ، مع رياح أخرى تأتى من اتجاهين جانبيين تعمل على تجميع الرمال . وتوجد معظم المساحات المغطاة بالكثبان الطولية بالقرب من المناطق التى يوجد بها إمداد متوسط من الرمال . وتنتشر الكثبان الطولية على نطاق واسع فى مصر . خاصة فى وسط الصحراء الغربية بمصر (شكل 16.15).

- **الكثبان النجمية:** توجد الكثبان النجمية **star dunes** على هيئة كثبان هرمية ضخمة منفصلة تشبه قاعدتها النجمة ، حيث تكون لها أذرع شعاعية متعرجة . وترتفع تلك الأذرع الشعاعية ناحية مركز الكثيب حتى تنتهى فى قمة حادة . وقد تصل الكثبان النجمية إلى ارتفاع يتراوح بين 50 و 150 مترا ، إلا أنها قد تصل إلى 300 متر فى الارتفاع . وتتكون تلك الكثبان تحت تأثير الرياح التى تهب من كل الاتجاهات . وتميل تلك الكثبان النجمية إلى أن تبقى ثابتة فى مكانها . وقد بقيت الكثبان النجمية فى صحراء المملكة العربية السعودية ثابتة فى مكانها لعدة قرون ، حيث أصبحت من العلامات المميزة للمسافرين فى تلك الصحارى.

الهلالية **crescentic dunes** ، وتتكون عادة فى مجموعات إلا أنه يكون مفردا أحيانا . وهو يتحرك على سطح مستو من الحصى أو صخر الأساس حيث تشير نقطتا الهلال (القرنان **horns**) إلى اتجاه الرياح السائدة ، ويتقدم وجه الانهيار المقعر فى اتجاه الرياح . وتتكون كثبان البرخان عندما يكون إمداد الرمال محدودا واتجاه الرياح ثابتا ومستمرا . وقد تهاجر كثبان البرخان لمسافات طويلة دون أن تغير من شكلها ، إلا أن شكلها قد يتغير إذا ما التحتمت بكثبان برخان أخرى أو اعترضها عائق صخرى أو نباتى . ويوضح شكل (17.15) بعض كثبان البرخان بوسط سيناء بمصر .

- **الكثبان المستعرضة:** قد تلتحم عدة كثبان برخان معا لتكون حيودا طويلة وضيقة ، حيث يكون اتجاه استطالتها مستعرضا أى عموديا على اتجاه الرياح . وتمثل هذه التلال الملتحمة مرحلة انتقالية بين كثيب البرخان والكثبان المستعرضة **transverse dunes** ، والتى تكون فى هيئة حيود متموجة طويلة وعمودية على اتجاه الرياح السائدة ، وهى بذلك تشبه أمواج المحيط التى تكون مستعرضة على اتجاه الرياح . وتتكون الكثبان المستعرضة فى المناطق الجافة القاحلة حيث تتواجد الرمال بوفرة وينعدم الغطاء النباتى تقريباً . وتكون أحزمة الكثبان الرملية قرب الشواطئ عبارة عن كثبان مستعرضة تتكون نتيجة الرياح القوية . وتستقر الكثبان المستعرضة فى المناطق المعتدلة أو الرطبة على مسافة من الشاطئ .
- **الكثبان الطولية:** تكون الكثبان الطولية **linear dunes** وتسمى أيضا الكثبان السيفية **seif dunes** (مستمدة من الكلمة العربية سيف) أو

القنوات والمجاري المائية، كما تهدد المدن أيضا. وتعالج هجرة الكثبان الرملية في تلك المناطق بزرع الكثبان بالنباتات التي تقاوم الجفاف وتعيش في التربة الرملية الجافة لتلك الكثبان. ويمنع الغطاء النباتي المستمر هجرة الكثبان للسبب نفسه الذى يمنع به التدرية، حيث تعمل جذور النباتات على تماسك التربة وحييات الرمل، وبالتالي تمنعها من الحركة، أى تمنع هجرة الكثيب.



شكل (17.15): صورة توضح هجرة الكثبان الرملية (برخان) على طريق المغارة - الاسماعيلية، وسط سيناء - مصر. (أ.د. محمود عبد الفتاح حسن، هيئة المواد النووية).

2- بحار الرمال

تعرف المنطقة الشاسعة من الرمال المتحركة في بعض الصحارى الكبرى، والتي يوجد بها تجمع هائل من الكثبان الرملية وتهب فيها الرياح بقوة ببحر الرمال sand sea، كما يعرف بحر الرمال أحيانا بصحراء العرق erg. وتتميز مناطق بحار الرمال بتوافر إمدادات كبيرة من الرمال وغياب الطرق الصالحة للانتقال عبرها، وعدم وجود معالم طبوغرافية محددة. وتوجد بحار الرمال في الصحارى الكبرى مثل تلك

• كثبان القطع المكافئ أو العكسي (البارابولية) وتعرف أيضا بالكثبان العكسية reversed dunes: تأخذ قمة كثيب القطع المكافئ parabolic dune شكل قوس في اتجاه الرياح مثل حرف U أو V، له ذراعان متديان يتحركان على الأرض. وهناك نوع من كثبان القطع المكافئ يسمى كثيب الانطلاق blowout dune يتكون بالقرب من الشواطئ. ويوجد هذا النوع من الكثبان في المناطق التي يتوافر بها إمدادا وفير من الرمال، حيث تهب الرياح المحملة بالرمال في اتجاه اليابس بعيدا عن الشاطئ، فيتكون منخفض يشبه طبق الفنجان نتيجة عملية التدرية ويتراكم الرمل على هيئة تل منحنى يشبه حدوة الحصان. وتستقر تلك الكثبان بالنباتات التي تنمو فوقها. وعلى عكس كثيب البرخان، الذى يشبه كثيب الانطلاق ظاهريا، فإن قرنا (ذراعا) كثيب القطع المكافئ يكونان في الاتجاه المواجه للرياح، ويكون وجه الانزلاق المنحنى محدبا، ويتقدم في اتجاه الرياح، لأن النباتات تعمل على تثبيت الذراعين بينما يتقدم الجزء الأوسط الذى يملأ أو تقل به النباتات إلى حد كبير.

- هجرة الكثبان: يؤدي انتقال الرمال من الجانب windward side إلى الجانب المداير lee side للنشاط إلى هجرة الكثيب ببطء في اتجاه الرياح. وقد أظهرت بعض القياسات التى أجريت على حركة كثبان البرخان أن معدل هجرتها كان كبيرا، حيث وصل إلى معدل 25 مترا في العام. ومن المعروف أن هجرة الكثبان (شكل 17.15)، وخاصة على امتداد الشواطئ الرملية وعبر الواحات في الصحارى، قد تسبب في دفن المنازل وحقول الزراعات، وفي ملء

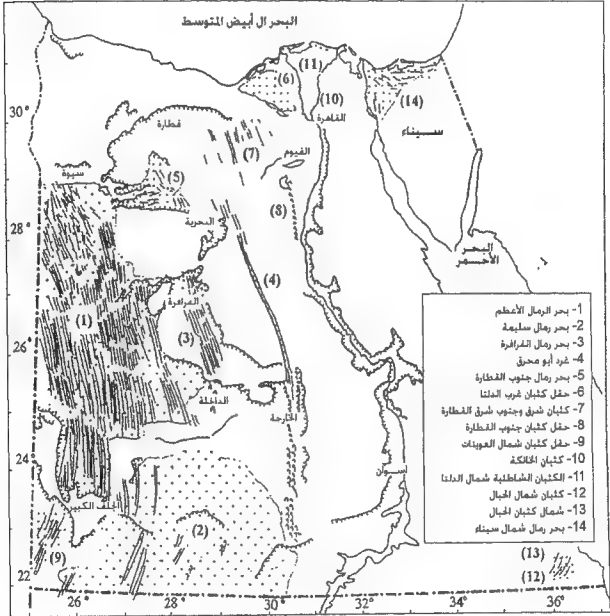
جدول 2.15: الأنواع الرئيسية للكتبان الرملية بناءً على شكلها .

الشكل	الوصف ومكان التواجد	الشكل	نوع الكتيب
	كتيب ذو شكل هلال وقرنان يشران إلى الاتجاه المداير للرياح . يوجد في المناطق الصحراوية المسطحة الصلبة التي يكون اتجاه الرياح فيها ثابتاً تقريباً، وإمداد الرمال محدوداً . وتتواجد كتبان البرخان أحياناً في مجموعات ، ويترأوح ارتفاعها بين متر واحد وأكثر من 50 متراً.	كتيب هلال	كتيب البرخان Barchan dune
	كتيب على شكل حيد أو مرتفع غير متماثل الشكل ، يكون عمودياً على اتجاه الرياح السائد . ويوجد في المناطق التي بها وفرة من الرمال . وقد يتكون نتيجة التحام عدد من كتبان البرخان ببعضها . وتشبه الكتيان المستعرضة سطح المحيط حين تهب عليه العواصف .	حيدو تشبه الأمواج	كتيب مستعرض Transverse dune
	كتيب على شكل حيد أو تل مرتفع طويل، يكون مستقيم الشكل تقريباً . ويوجد في المناطق الصحراوية التي يكون بها إمداد متوسط من الرمال، ويكون اتجاه الرياح فيها متغيراً ، غالباً اتجاهان فقط .	حيدو متوازية	كتيب طول Linear dune
	تل هرمي منفصل ، يشبه قاعدة النجمة المتعرجة، وتكون قمته مركزية . وقد يصل ارتفاع الكتيب النجمي إلى 300 متر، ويوجد في المناطق التي تهب فيها الرياح من كل الاتجاهات.	نجمة لها أذرع متعددة	الكتيب النجمي Star dune
	عكس كتيب البرخان تقريباً ، حيث يأخذ شكل حرف U أو V وتكون نهايته المفتوحة في اتجاه الرياح الصاعد. الذراعان المتدليان يشران أيضاً إلى الاتجاه المواجه للرياح . ويشيع تواجد كتيب القطع المكافئ في المناطق الساحلية وفي المناطق التي تظهر فيها بعض النباتات .	قوس منحنى	كتيب القطع المكافئ أو العكسي Parabolic dune

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

الكبرى بأفريقيا. ويوضح (شكل 18.15) توزيع بحار الرمال وحقول الكتيان الرملية في مصر، بينما يوضح جدول (3.15) مساحات بحار الرمال وحقول الكتيان الرملية بالصحراء الغربية المصرية .

الموجودة في شمال وغرب أفريقيا وشبة الجزيرة العربية والصحاري الكبرى في غرب الصين وفي غرب ووسط استراليا . وقد يغطي بحر الرمال مساحات تصل إلى 500000 كم² أو أكثر كما هو الحال في الصحراء



شكل (18.15): توزيع بحار الرمال وحقول الكتيان في مصر .

(After Embabi, N. S., 2004: The Geomorphology of Egypt: Landforms and Evolution, vol. 1. The Egyptian Geographic Soc., Cairo).

جدول (3.15): مساحة بحار الرمال وحقول الكثبان الرملية في الصحراء الغربية - مصر

الاسم	(1) المساحة الكلية (كم ²)	(2) مساحة الكثبان (كم ²)	النسبة المئوية لمساحة الكثبان
بحار الرمال Sand Seas			
بحر الرمال الأعظم	114400	85600	74.6
الغطاء الرمالى لواجهة سليمة	63200	56000	88.6
بحر الرمال جنوب القطارة	10400	6800	65.4
بحر رمال الفرافرة	10300	7000	68.0
غرد أبو محرق	6000	4000	66.6
حقول الكثبان Dune Fields			
شرق وجنوب شرق القطارة	28754	6127	21.3
شمال العوينات	8000	2800	35.0
غرب الدلتا	4400	3200	72.7
جنوب الريان	1200	0.375	31.1
المجموع	246654	171527	69.5

(After Embabi, N.S., 2004: The Geomorphology of Egypt: Landforms and Evolution, Vol. 1. The Egyptian Geograph. Soc., Cairo).

3- لُؤس: الأتربة المتساقطة

إلى انجذاب جزيئات حبيبات الراسب بشدة بحيث تجعل منه صخوراً متاسكا، كما أنه من السهل جدا تعريته بالمياه الجارية، كما يحدث على جوانب نهر الهوانجهو في الصين، عندما يزول الغطاء النباتي عنه. ويتميز اللويس بخاصتين تدلان على أنه ترسب بواسطة الرياح وليس من مياه المجارى المائية: (1) يكون اللويس غطاء منتظما نسبيا يغطي التلال والوديان بالطريقة نفسها على مدى واسع مع الارتفاعات، (2) يحتوى اللويس على حفريرات نباتية أرضية land plants وحيوانات تنفس الهواء.

وتوجد أشد رواسب اللويس سمكاً في شمال الصين، حيث توجد طبقة يبلغ متوسط سمكها حوالى 30 متراً، بينما يبلغ السمك أحياناً حوالى 180 متر، وتغطي هذه الرواسب آلاف الكيلومترات. ويسدو أن مصدر

نغفى سطح الأرض في مناطق كثيرة من العالم، وخاصة عند خطوط العرض الوسطى، رواسب من التراب dust وغيره من الرواسب الدقيقة الأخرى التى تكونت نتيجة الترسب من عواصف ترابية على امتداد آلاف السنين. ويعرف هذا الراسب بلُؤس loess (من كلمة ألمانية بمعنى مفكك وتنطق عادة لُوس). ويتميز اللويس بأنه تراب ترسب بواسطة الرياح، ويتكون معظمه من الغرين، ولكن يصاحبه عادة بعض الرمل الناعم والصلصال. وعموماً، فإن اللويس يكون لونه أصفر إلى الحمى ومتجانس ولا يوجد به أى تطبق. ويميل اللويس لأن يتكسر على امتداد جروف رأسية عندما ينكشف نتيجة قطعه بمجرى مائى أو أثناء شق الطرق، كما لو أنه صخر التهمت حبيباته بشدة. وترجع خاصية تماسك اللويس

إلا أن التقدم العلمى الحديث فى تقنيات تحلية المياه وفى إيجاد مصادر صناعية للماء غير معنى هذه الكلمة ، وأصبحت كثير من المناطق الصحراوية الآن أهلة بالسكان ومناسبة للزراعة . ومثال ذلك المنطقة الصحراوية فى شبه الجزيرة العربية ، ومحاولة تعمير الصحارى فى مصر وليبيا وغيرها من مناطق العالم . ولذلك يستخدم مصطلح صحراء desert الآن كمرداف للأرض التى يكون معدل الأمطار السنوى فوقها أقل من 250 مم ، أو التى يزيد فيها معدل البحر عن معدل سقوط الأمطار ، بغض النظر عن تواجد سكان من عدمه . ولذلك يعتبر الجفاف (القحولة)

صفة مميزة لأى صحراء . ويسود المناخ الجاف فى المناطق الصحراوية ، حيث لا يساعد ذلك المناخ على خصوبة الأرض ، ويتميز بندرة المطر أو انعدامه وشدة الرياح وقوة الإضاءة وشدة ارتفاع درجة الحرارة وانخفاضها . وقد يطلق مصطلح صحراء على المناطق القطبية أيضا .

أ. مناطق تواجد الصحارى

تمثل المناطق الصحراوية بمختلف أنواعها حوالى 30 ٪ من مساحة اليابس العالم ، باستثناء المناطق القطبية . وبالإضافة إلى ذلك ، فإنه توجد نسبة أقل من الأراضى شبه الجافة semiarid land ، والتى تتميز بأن معدل الأمطار السنوى بها يتراوح بين 250 مم و500 مم . وتمثل المناطق الجافة وشبه الجافة نموذجاً مميزاً على خريطة العالم (شكل 1.15) ، حيث إن توزيع المناطق الصحراوية على الكرة الأرضية ليس عشوائياً ، وإنما يرتبط كما سبق أن ذكرنا ، بجغرافية الأرض وبلورة الغلاف الجوى وأحزمة الرياح . وقد أمكن التعرف خمسة أنواع من الصحارى (جدول 15-4) .

الراسب كان من داخل قارة آسيا . وتستخدم أحيانا رواسب اللويس فى عمل الكهوف والسكنى نظراً لسهولة حفرها ، سواء فى الصين أو وسط أوروبا . ويرجح أن وجود اللويس فى شرق السودان يرجع إلى أن تلك الرواسب قد نشأت فى الصحراء الكبرى فى غرب السودان . وقد وجدت أيضا مساحات شاسعة من رواسب اللويس فى الولايات المتحدة ووسط أوروبا ووسط آسيا والأرجنتين حيث تستخدم تلك الرواسب فى الزراعة ، مع إمكانية تعرضها للتعرية فى الوقت نفسه .

4- الرماد البركاني

لا تنشأ كل الرواسب المتكونة بالرياح من عملية التذرية . فهناك كميات ضخمة من التفرات tephra (الفتات النارى) تقذف أثناء ثوران البركان فى الغلاف الجوى . وعلى الرغم من أن الحبيبات الخشنة والثقيلة تتساقط بسرعة من عنق البركان ، إلا أن الحبيبات الدقيقة يمكن أن تحمل لمسافات بعيدة . وتستطيع الحبيبات الدقيقة التى تصل إلى طبقة الاستراتوسفير أن تدور حول الأرض عدة مرات . وتكون الحبيبات التى تتساقط أثناء ثوران البركان تياراً صاعداً مستطيلاً من الرواسب ، والتى يقل فيها حجم الحبيبات وكثافتها كلما ابتعدنا عن البركان . ويمكن للجولوجيين عند فحص الطبقات المتكونة من الرماد البركانى استنتاج مسارات الرياح التى سادت أثناء نشاط البركان . وعلى الرغم من أن رواسب الرماد البركانى تشبه رواسب اللويس ، إلا أنه يمكن عند تحديد التركيب المعدنى النارى ووجود فتات من الزجاج البركانى تمييز طبقات التفرات من اللويس .

II. الصحارى

على الرغم من أن كلمة "صحراء" تعنى حرفياً منطقة غير مأهولة بالسكان وخالية تقريباً من النباتات ،

وعندما نقارن الشكل الذى يوضح التوزيع العام لأحزمة الرياح فوق سطح الكرة الأرضية نتيجة دوران الغلاف الجوى (شكل 4.15)، مع خريطة توزيع المناطق الجافة وشبه الجافة وتوزيع الصحارى الرئيسية (شكل 1.15)، فإن تلك المقارنة توضح على الفور وجود علاقة بينهما. وترتبط معظم الصحارى، بحزامين حول العالم للهواء الجاف الهابط بين خطى عرض 20° و 30°. وتشمل أمثلة تلك المناطق صحارى كالاهارى والصحراء الكبرى فى شمال أفريقيا، والربع الخالى فى المملكة العربية السعودية وإيران وصحراء أستراليا الكبرى. وتمثل هذه الصحارى النوع الأول من الصحارى وهى الصحارى شبه المدارية semitropical.

ويوجد النوع الثانى من الصحارى فى المناطق القارية الداخلية بعيدا عن مصادر الرطوبة، حيث يسود صيف حار وشتاء بارد (مناخ قارى). ويشمل هذا النوع صحارى جوبى وتكلاماكان فى وسط آسيا.

ويوجد النوع الثالث من الصحارى عندما تعمل سلسلة جبال كمحاجز لانسياب الهواء الرطب المناسب من المحيط، مما يسبب وجود منطقة فى الجانب المدابر للجبل يقل فيها تساقط الأمطار، وتسمى تلك المنطقة بظل المطر rainshadow. وعندما يصعد الهواء البحرى المتحرك على الشاطئ على الانحدار المواجه للرياح لآى سلسلة جبلية فإنه يبرد، مما يقلل كمية الرطوبة التى يمكن أن يحتفظ بها الهواء، وتساقط الأمطار على الجانب المواجه للرياح. ويحتوى بذلك الهواء الذى يصل إلى الجانب المدابر لسلسلة الجبال على قليل من الرطوبة، مما يؤدي إلى نشأة مناخ جاف فوق المنطقة خلف سلسلة الجبال. وتكون سلسلة الكاسكيد وسيرانيفاذا فى غرب الولايات المتحدة مثل هذا المحاجز مما يتسبب فى نشأة مناطق صحراوية شرق هذه الجبال مباشرة.

ويوجد النوع الثانى من الصحارى فى المناطق القارية الداخلية بعيدا عن مصادر الرطوبة، حيث يسود صيف حار وشتاء بارد (مناخ قارى). ويشمل هذا النوع صحارى جوبى وتكلاماكان فى وسط آسيا.

جدول (4-15) أنواع الصحارى الرئيسية وأصلها

نوع الصحراء	الأصل	الأمثلة
شبه مدارية Subtropical	تتركز فى أحزمة هبوط الهواء الجاف عند خطوط عرض 20°-30° شمالا وجنوبا تقريبا.	الصحراء الكبرى والسند وكلهارى وأستراليا الكبرى
قارية Continental	فى المناطق القارية الداخلية بعيدا عن مصادر الرطوبة	جوبى وتكلاماكان فى وسط آسيا
ظل المطر Rainshadow	فى الجانب المدابر من حواجز الجبال التى تعترض الهواء المناسب من المحيط المحمل بالرطوبة	الصحارى الواقعة فى الجانب المدابر من السيراتيفادا والكاسكيد والأنديز
ساحلية Coastal	الحواف القارية حيث يسبب ماء البحر المتدفق لأعلى تبريد الهواء البحرى المناسب من البحر ناحية الشاطئ	سواحل بيرو وجنوب غرب أفريقيا
قطبية Polar	فى المناطق التى يهبط بها هواء جاف بارد، مما يسبب تساقط قليل جدا من الأمطار	شمال جرينلاند ومناطق أنتاركتيكا الخالية من الجليد

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

ب - مناخ الصحراء

ينشأ المناخ الجاف (القاحل) arid climate في الصحارى الحارة من ارتفاع درجة الحرارة ، بالإضافة إلى ندرة سقوط المطر وارتفاع معدل البخر. ولقد سُجلت درجة حرارة الهواء فوجد أنها وصلت إلى أكثر من 50 درجة مئوية في دولة قطر في الخليج العربى وحوالى 58° في الصحراء الليبية في شمال أفريقيا . ولقد مر عقد من الزمان أو أكثر على صحراء أتاكاما في شمال شيلي دون سقوط أى أمطار . ويؤدى ارتفاع درجة الحرارة في مثل هذه الصحارى الحارة إلى زيادة معدل التبخر.

وترتفع درجة حرارة الهواء فوق مناطق الصحراء الساخنة في ساعات النهار ، حيث يتمدد الهواء ويرتفع لأعلى . وتنشأ الرياح القوية نتيجة حركة الهواء السطحي ليحل بسرعة محل الهواء الساخن الصاعد . لذلك تتميز الصحارى الحارة بأنها قاحلة ، وأن الرياح بها تكون قوية أيضاً .

ج - التجوية في الصحراء

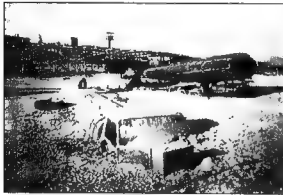
تعمل العمليات الجيولوجية نفسها في كل من الصحارى والمناطق الرطبة ، رغم الاختلاف بينهما . حيث تعمل عمليات التجوية والنقل بالطريقة نفسها ، ولكن مع اختلاف شدة كل منهما . فتسود التجوية الفيزيائية على التجوية الكيميائية في الصحارى . وتتكون معادن الصلصال نتيجة التجوية الكيميائية للفلسبارات والمعادن السيليكاتية الأخرى ، ولكن بكميات صغيرة ويبطء نتيجة نقص المياه اللازمة لذلك التفاعل ، وتذرو الرياح القوية معادن الصلصال القليلة التى تكونت ، مما يسبب عدم تكون تربة ذات سمك معقول . لذلك فإن التربة في الصحارى تكون رقيقة ومتباعدة على هيئة بقع متباعدة .

وتتواجد الصحارى الساحلية على حدود القارات ، حيث تنخفض درجة حرارة الهواء البحرى المنسدع في اتجاه الشاطئ نتيجة تأثير ماء البحر البارد المتدفق لأعلى مما يقلل من قدرة الهواء على أن يحتفظ بأى رطوبة . وعندما يقابل الهواء البارد الأرض الدافئة ، فإن محتواه المحدود من الرطوبة يتكثف ويتكون ضباب ساحلى . وعلى الرغم من وجود الضباب ، فإن محتوى الهواء من الرطوبة يكون قليلا جدا لكى يسبب سقوط أمطار غزيرة ، ولذلك تبقى المنطقة الساحلية صحراوية . وتعتبر الصحارى الساحلية الموجودة في بيرو وجنوب غرب أفريقيا ، والتي تمثل النوع الرابع من الصحارى ضمن أكثر المناطق جفافا على وجه الأرض . وتتميز الأنواع الأربعة السابقة من الصحارى بأنها صحارى الحارة ، حيث يكون تساقط المطر منخفضا ودرجات حرارة فصل الصيف مرتفعة .

ويشمل النوع الخامس من الصحارى ، مساحات شاسعة من صحارى المناطق القطبية، حيث يكون تساقط المطر نادرا للغاية أيضاً ، نتيجة هبوط هواء بارد جاف . وعلى الرغم من ذلك التشابه، إلا أن الصحارى الباردة تختلف عن الصحارى الحارة عند خطوط العرض المنخفضة في أمر مهم ، وهو أنه يوجد وفرة من الماء تحت سطح الصحراء القطبية ، ولكن يكون معظمها في شكل جليد . وقد تبقى درجة حرارة الهواء تحت درجة التجمد حتى في منتصف فصل الصيف ، حين تكون الشمس فوق الأفق لمدة 24 ساعة يوميا . وتوجد الصحارى القطبية في شمال جرينلاند بالمنطقة القطبية الشمالية في كندا وفي الوديان الخالية من الجليد في أنتاركتيكا (القارة القطبية الجنوبية). وتعتبر تلك الصحارى أقرب مناطق الأرض شبيها بسطح المريخ ، حيث تبقى درجات الحرارة أيضاً تحت درجة التجمد ويكون الغلاف الجوى جافا للغاية.

ويستمر نهر النيل في الانسياب عبر الصحارى القاحلة رغم عملية التبخر، وينقل كمية كبيرة من الماء. وتتميز المجارى المائية في الصحراء عموما بتباعدتها عن بعضها نظرا لقلة المياه، ولكن تتميز أنماط شبكات الصرف بها أنها تشبه مثيلاتها في البيئات الأخرى.

ولا يمنع الغطاء النباتي المتناثر والقليل في الصحراء من جريان الماء المتساقط على سطح الأرض. ويعمل ماء الصرف السطحي هذا على تعرية ونقل الصخور المتكسرة غير المتماسكة التي تكوّن سطح الأرض وتغطي صخر الأساس، وتعرف بالخطام الصخرى (الآديم) regolith. ويصاحب العاصفة المطيرة الشديدة عادة فيضان مفاجئ flash flood على، يسبب تدفق كميات ضخمة من الماء، ويستمر لفترات قصيرة ينقل خلالها كميات كبيرة من الرواسب. ويكون الخطام الصخرى الناشئ من تلك الفيضانات مراوح عند منحدرات الجبال وعلى أرضية الوديان المتسعة والأحواض.



شكل (19.15): رواسب متراكمة من الطين والرمال في مساحات منخفضة تغمر المركبات بقرية درنكة قرب أسبوط، جنوب مصر، بسبب السيول المحملة بكميات كبيرة من الرواسب والخطام الصخرى إثر سقوط الأمطار في نوفمبر 1994م.

(After Ashour, M.M., 2002: Flash floods in Egypt (A case study of Durunka Village, Upper Egypt. Bull. Egypt. Geograph. Soc., V. 75).

ويسود في العديد من المناطق الصحراوية اللون البني الداكن، الذي يكون طلاءً قائماً لامعاً يغطي أسطح الصخور، ويتكون من خليط من معادن الصلصال مع كميات أقل من المنجنيز وأكاسيد الحديد، ويسمى هذا الطلاء الداكن ورنيش الصحراء desert varnish، وهو يتكون نتيجة التجوية البطيئة لمكاشف الصخور لفترات طويلة تصل لآلاف السنين.

1 - المجارى المائية: عامل تعرية مهم في الصحارى

يسود اعتقاد خاطئ بين الناس أن الصحارى تتكون فقط من امتدادات شاسعة من الكثبان الرملية، حيث تغطي الرمال حوالى خمس مساحة الصحارى في العالم. وعلى سبيل المثال، فإن الرمال تغطي ثلث مساحة شبه الجزيرة العربية، وهى تعتبر من أكثر مناطق العالم التي تتواجد بها الرمال، بينما تغطي الرمال عشر مساحة الصحراء الكبرى في شمال أفريقيا. وتعتبر الواحات المتناثرة بالصحارى أماكن يصل فيها منسوب الماء الجوفى (الأرضى) محلياً إلى سطح الأرض، ومن أشهر الأمثلة على ذلك الواحات المتناثرة بالصحراء الغربية المصرية مثل الواحات البحرية والفرافرة وسبوة وغيرها.

وتقطع معظم المناطق التى لا تغطيها الرمال المجارى المائية، أو تُغطى بمراوح وسهول طميية. ولذلك فإن معظم التعرية في كثير من الصحارى تتم نتيجة عمل المجارى المائية، وليس بعمل الرياح.

ولا تصل معظم المجارى المائية الصحراوية إلى البحر، وإنما تنساب في الصحارى وتختفى بسرعة، إما نتيجة بخر الماء أو تملؤها وتسربها في الأرض. ويستثنى من ذلك الأنهار الكبرى الطويلة مثل نهر النيل، الذى ينشأ في هضبة البحيرات المرتفعات الأثيوبية الرطبة بشرق أفريقيا وينساب خلال السودان ثم مصر.

في العالم ، بينما تغطي بقية مساحة الصحارى الرصيف الصحراوي أو الصخور. ونادراً ما تكون المياه الجارية في المناطق القاحلة كافية بدرجة تسمح بالاحتفاظ بها لكي تكون بحيرات دائمة. وتسمى تلك البحيرات الدائمة أو المؤقتة التي تتجمع في أودية الجبال أو أحواض المناطق القاحلة ببحيرات البلايا **playa lakes**. وقد تكون مياه بحيرات البلايا سامة نظراً لارتفاع نسبة الملوحة أو القلوية ، نتيجة للبخار أو ذوبان الأملاح بالمجاري المائية في الصحراء . وعندما تبخر مياه البحيرة ، فإن نواتج التجوية والتعرية الدائبة في تلك المياه تتركز وتبدأ في الترسيب تدريجياً. وقد يكون التبخير كاملاً بحيث تصبح البحيرة جافة وتكوّن بلايا (بحيرة جافة) **playa** (من الإسبانية بمعنى شاطئ). وقد تتراكم الأملاح البيضاء أو الرمادية عند السطح الجاف للبلايا ، والتي قد تزداد نتيجة تكرار عملية التكون والبحر إلى سمك يصل إلى عشرات الأمتار. وتعتبر البلايا من أهم رواسب المتبخرات في البيئة الصحراوية ، وهي مصدر مهم للكميائيات الصناعية (كربونات الصوديوم) والبوراكس (بسورات الصوديوم) وأملاح أخرى غير عادية.

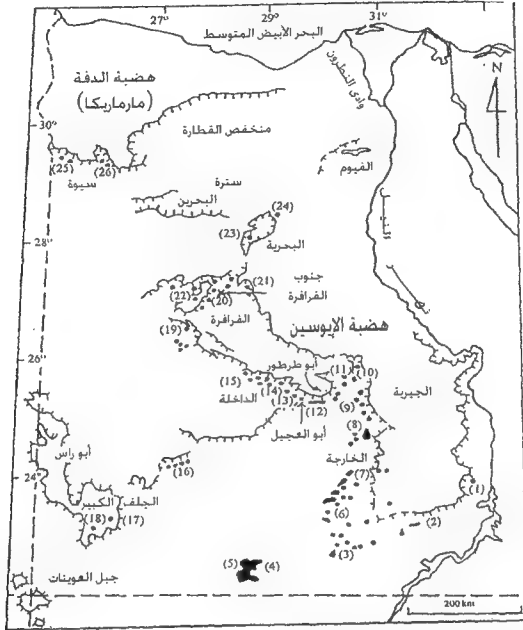
ويوضح شكل (15. 20) توزيع البلايا القديمة بالقرب من من الواحات الكبرى في الصحراء الغربية المصرية . ويتضح أن هناك أكثر من 100 بلايا تزيد مساحة كل منها عن كيلومترين ، وتتركز في الجزء الجنوبي من الصحراء الغربية ، منها 25 بلايا في الواحات الداخلة و 21 بلايا في الواحات الخارجة و 24 بلايا في الفرافرة . كما تتواجد بعض البلايا الأخرى التي تقل مساحتها عن كيلومترين مربعين على أسطح الهضاب والوديان .

وفي مصر ، فقد تسببت الأمطار الغزيرة التي سقطت في الثاني من نوفمبر 1994م فوق قرية درنكة ، قرب مدينة أسبوط في حدوث سيول أدت إلى حدوث انسياب للمياه من منحدرات التلال على امتداد الوديان، نقلت التربة والحطام الصخري ورواسب من مختلف الأحجام إلى القرية . وقد تسببت مياه السيول المحملة بكميات كبيرة من الرواسب والحطام الصخري في انفجار أربع خزانات للوقود بالقرية واشتعلت بها النيران ، وتسببت الغازات والحرارة في مقتل 399 شخصاً من مختلف الأعمار . كما تسببت رواسب الطين والرمال ، التي وصل سمكها إلى أكثر من متر في الأراضي المنخفضة ، في نفوق أعداد كبيرة من المواشي وغرق الأراضي الزراعية وتدمير أعمدة الهاتف والكهرباء بالقرية ، كما غمرت الطرق ودفنت السيارات تحت رواسب الطين والرمال (شكل 19.15) .

د - الرواسب والترسيب في الصحارى

عندما تحفّ الفيضانات المفاجئة والمحملة بالرواسب ، فإنها تترك رواسب مميزة على قيعان الأودية الصحراوية ، حيث يغطي الحطام الصخري الحشن كل أرضية الوادي دون أن تتباين الرواسب إلى رواسب مجارى مائية وسهول فيضية وجسور طبيعية **natural levees**، كما يحدث عادة في مجارى الأنهار . وقد يتكون في عديد من الأودية الصحراوية الأخرى تداخلا بين رواسب المجارى المائية ورواسب السهول الفيضية والرواسب الريحية (الناتجة من فعل الرياح) **aeolian sediments** .

وتعتبر الكثبان الرملية وحقول الكثبان وبحار الرمال أكثر التراكمات الرسوبية الريحية إثارة للاهتمام ، حيث تغطي الرمال حوالى خمس المساحات الصحراوية



شكل (20.15): توزيع البلايا القديمة في الصحراء الغربية المصرية.

- (1) كركر، (2) دنجل، (3) نابتة، (4) بير طرغاوى، (5) بير صحارا شرق، (6) بير مر، (7) جبل الوائف، (8) سهل باريس، (9) بولاق، (10) المحاريق، (11) أم الدباب، (12) سهل الزيات، (13) بلاط، (14) موط، (15) غرب الموهوب، (16) أبو بلاص، (17) وادي بخت، (18) وادي أرض الأخضر، (19) أبو منقار، (20) قصر الفرافرة، (21) بير قراوين، (22) وادي الأبيض، (23) الحيز، (24) شمال شرق البحيرة، (25) غرب سيوة، (26) شرق سيوة.

(After Embabi, N. S., 2004: The Geomorphology of Egypt: Landforms and Evolution, The Egyptian Geographic Soc., vol., Cairo).

معالم الأرض في الصحارى

ومغطاة بالرمال والكثبان وأرصفت الصحراء والبلايا،

تتميز معالم الأرض في الصحارى بالتنوع الشديد،

حيث تكون هناك مساحات منخفضة واسعة وتمتدة
بنينا تكون الأراضي المرتفعة صخرية ويقطعها أودية
أنهار عميقة أو أودية ضيقة لها جوانب شديدة الانحدار

من الرواسب عند مصب الأخدود يعرف بالمروحة الفيضية (الطمية) **alluvial fan** (شكل 24.12).
وحيث إن الحطام الصخري الأكبر حجماً يترسب أولاً، فإن رأس المروحة يكون أكثر انحداراً، أى ما يقارب 10-15°، ويقل حجم الرواسب ودرجة الانحدار كلما تحركنا أسفل المروحة. حتى تتدرج مع قاع الوادى الذى يصب فيه المجرى المائى. ويوضح الفحص الدقيق لسطح المروحة الفيضية (الطمية) أن قنوات المجرى المائى على سطح المروحة يكون من النمط المجدول **braided pattern**، حيث يمتزج المجرى المائى بالرواسب، مما يجعله يفرغ ويتلاقى مرات عديدة مكوناً الكثير من المجرى المتعرجة. وتزيد المروحة الفيضية (الطمية) في الحجم مع مرور الزمن، حيث تلتحم في النهاية مع مراوح من أخاديد متجاورة لتكون غطاء من الرواسب تسمى **bajada** (من الإسبانية بمعنى منحدر) عند قاعدة الجبل، ويكون سطحها متموجاً نتيجة لتحركات المرواح التى تكونها. وقد تتكون البجادة عندما تكون الأخاديد مقاربة عند قاعدة الجبل.

ب - البيدمنت (السفوح الجبلية)

تعتبر البيدمنت (السفوح الجبلية) أحد أهم الملامح الأرضية المميزة للمناطق الجافة. والبيدمنت (السفوح الجبلية) **pediment** رصيف من صخر الأساس واسع ولطيف الانحدار يشكل عتبة أمام سلسلة جبال في المناطق الجافة، حيث تم تعرية وتراجع مقدمة الجبل من الوادى (شكل 21.15 أ و ب). وقد تغطي بعض أجزاء البيدمنت بطبقة رقيقة من الرمل الطمى والحصى وتتحدر بعيداً عن قاعدة الأرض المرتفعة (شكل 21.15 ج). ويوضح القطاع المستعرض (البروفيل) في بيدمنت نموذجى وفي الجبال المجاورة لها، مثل القطاع المستعرض في المروحة الطمية أن منحدر الجبال يكون شديد الانحدار ثم يستوى فجأة

وعظيمة الارتفاع وتكاد تكون رأسية، تعرف بالخوانق **gorges** (جمع خانق). ويؤدى نقص التربة والغطاء النباتى إلى أن تبدو المعالم الأرضية ومنظر الأرض **landscape** عموماً أكثر حدة وقسوة من منظر الأرض في المناخات الرطبة. فبينما تكون المنحدرات في المناطق الرطبة مستديرة ومغطاة بالتربة وبها غطاء نباتى، فإن المنحدرات في الصحارى تكون شديدة الانحدار ووعرة وتكون جروفا **cliffs**. وتغطي المنحدرات شديدة الانحدار كسرات صخرية غير متجانسة ومختلفة الأحجام بسبب تسوية تلك المنحدرات، بينما تتجمع كتل الركام **talus** عند قاعدة الجرف والمكون من ذلك الحطام الصخري المتساقط من أعلى المنحدر.

وتتميز الأودية في الصحارى بأن لها القطاع الطولى نفسه (البروفيل) للأودية في البيئات الأخرى، إلا أن معظم الأودية في الصحارى تتميز بالجفاف والجوانب شديدة الانحدار، نتيجة التعرية السريعة بسبب تحرك الكتل والمجرى المائية.

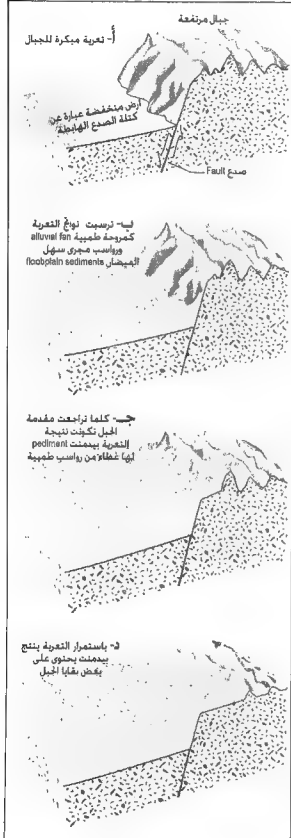
ونستعرض فيما يلى أهم المعالم التى تميز الأرض في الصحارى.

أ - المرواح الفيضية (الطمية) والبجادة (المنحدرات الطمية)

تتكون المرواح الفيضية (الطمية) في العديد من بيئات الترسيب. ولكنها تكون شائعة في المناطق القاحلة وشبه القاحلة، حيث تتكون أساساً من الطمى والفتات الصخري المنحمول في المجرى المائية. وتتكون المرواح الفيضية (الطمية) عندما يحدث انخفاض مفاجئ في سرعة المياه المتدفقة عبر الأخاديد الخائفة **canyons** التى تقطع سلاسل الجبال، حيث تنتشر المياه الجارية على المنحدرات اللطيفة عند سفح الجبل، وترسب بالتالى معظم حمولة المجرى المائى خلال مسافة قصيرة، حيث يتكون نتيجة ذلك مخروط

والطريقة التي تتكون بها البيدمنت غير واضحة تماما، إلا أن هناك بعض الأدلة على أنها قد تتكون

في منحدر البيدمنت اللطيف الانحدار (شكل 21.15 د).



شكل (21.15): مراحل تطور بيدمنت pediment نموذجي، وهو أحد أشكال التعرية في المناطق الجبلية الجافة (القاحلة).

- تتكون أرض منخفضة نتيجة الصدع
- ترسب نواتج التعرية مثل المراوح الطميية وسهول الفيضان في الأراضي المنخفضة
- عندما تراجع مقدمة الجبل فإن التعرية تؤدي إلى تكون بيدمنت تغطي طبقة رقيقة من الرواسب الطميية
- تؤدي التعرية المستمرة لفترة طويلة إلى تكون بيدمنت متسع مع بقايا من الجبل. ثم تراجع مقدمة الجبل ببطء مع الحفاظ على زاوية انحدار حادة، عكس ما يحدث في المناخات الرطبة، حيث تتكون منحدرات لطيفة.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

د- الميسات (الربوات) والبيوتات (التلال النضيدية)

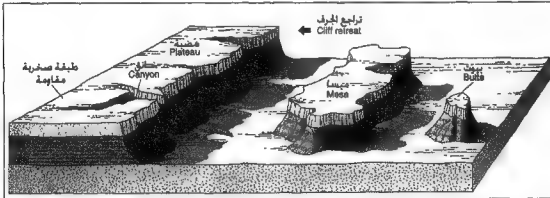
يتكون نتيجة طغيان البحر الضحل وانحساره تتابع من طبقات الرمل والطفل، أو الحجر الجيري والطفل. وعادة ما يكون الطفل صخوراً ضعيفاً غير مقاوم للتعرية، بينما تكون طبقات الحجر الرملي والجيري أكثر مقاومة نسبياً. وعندما تعمل التعرية في مثل هذا التتابع من الصخور، فإن طبقات الحجر الرملي أو الحجر الجيري المقاومة للتعرية تكون غطاء يحمي ما تحته يعرف بصخر الغطاء cap rock، مما يؤدي إلى تكون هضبة plateau مستوية القمة تقريباً. وتؤدي التعرية وتراجع المنحدر على امتداد حافة الهضبة إلى تكون جروف على امتداد الطبقات المقاومة للتعرية ومنحدرات على امتداد الطبقات الضعيفة. ويعتبر هذا مثال شائع على التفاوت في التعرية (شكل 22.15).

ومع تقدم التعرية، فإن جزءاً كبيراً من الهضبة يُزال لكي تتكون ميسا (ربوة) mesa (من الإسبانية بمعنى منضدة)، وهي عبارة عن أرض مرتفعة تشبه المنضدة يتكون سطحها العلوي المنبسط من طبقات مقاومة للتعرية، بينما تكون منحدراتها شديدة مثل الهضبة. وتنكمش الميسا بدورها نتيجة تراجع المنحدرات على

نتيجة تغير المجارى المائية لمجرها بسبب وجود جبال في مسارها. وتراجع تلك الجبال في الوقت نفسه وهي مازالت محتفظة بشدة انحدارها، بدلاً من أن تصبح أكثر استدارة وأقل حدة في الانحدار كما يحدث في المناطق الرطبة.

ج. الجبال المنعزلة (الجزيرية)

الجبال المنعزلة (الجزيرية) inselbergs عبارة عن جبال أو تلال مفردة ناتئة وسط أرض واسعة منبسطة، وهو مصطلح مشتق من لفظة ألمانية تعنى جبلاً جزيرية. وهي تشبه الجزر الصخرية الناتئة وسط المحيط. وتتميز بوجود قمم بارزة، إلا أنها مستديرة ملمساء وذات جوانب شديدة الانحدار تكاد تكون رأسية. وهي تنشأ في بيئات عديدة تتراوح بين البيئة الساحلية وحتى الداخلية، ومن البيئات الجافة (القاحلة) إلى الرطبة. ومع ذلك فإن الجبال المنعزلة تكون أكثر شيوعاً في الأراضي شبه الجافة في وسط القارات المستقرة كتونينا. وتوجد أمثلة عليها في جنوب ووسط أفريقيا وشمال غرب البرازيل ووسط استراليا.



شكل (22.15): الهضاب والميسات (الربوات) والبيوتات. عندما يتراجع جرف عند حافة هضبة، فإن الهضبة تترك وراءها ميسا (ربوة) mesa وتلاً نضيدياً butte كبقايا لتعرية وتآكل الهضبة.

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

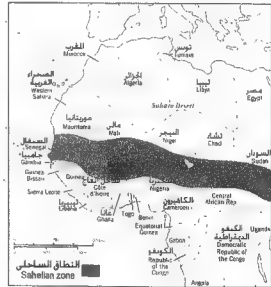
ويقع في المنطقة جنوب الصحراء الكبرى في شمال أفريقيا حزام من الأرض العشبية الجافة يضم عددا من الدول ، حيث يتراوح المعدل السنوي لسقوط الأمطار في هذا الحزام من 100 إلى 300 مم ، يتساقط معظمها خلال موسم مطر واحد قصير . ويسمى هذا الحزام بالساحل Sahel أو النطاق الساحلي Sahelian zone (شكل 23.15) . وقد تعرض الساحل لأسوأ موجة قحط في القرن العشرين (1968-1974م) ، حين لم تساقط الأمطار لعدة سنوات متتالية مما تسبب في امتداد الصحراء المجاورة جنوبا لمسافة وصلت أحيانا إلى 150 كم . وقد امتد القحط من المحيط الأطلنطي إلى المحيط الهندي لمسافة حوالى 6000 كم ، وأثر في حوالى 20 مليون نسمة على الأقل ، معظمهم من الرعاة الرحل . وترجع شدة القحط إلى زيادة عدد السكان إلى الضعف خلال الفترة من عام 1935م حتى عام 1970م ، بالإضافة إلى زيادة عدد الماشية بشكل مثير . وقد أدت زيادة عدد السكان والحيوانات إلى زيادة معدل الرعى لدرجة أنه عند حدوث القحط ، فشل الغطاء النباتي الموجود في تغطية حاجة السكان كما تفق 40٪ من الماشية التى وصلت إلى عدة ملايين . وقد عانى ملايين البشر من الظمأ والجوع بينما مات الكثير منهم وهاجر الملايين جنوبا بحثا عن الطعام والماء . وقد عاودت الأمطار السقوط في منتصف السبعينيات . وأثرت ظروف القحط في عام 1980م على إثيوبيا والسودان حيث انتشرت أيضاً المجاعة .

ويسمى غزو الصحراء لمناطق غير صحراوية بالتصحّر . ويتفصيل أكثر فإن التصحّر desertification هو التحول الدائم لسطح الأرض حتى يشبه الصحراء ، بسبب النشاط الإنسانى المدمر لحشائش الرعى والشجيرات والأشجار والرعى الجائر واستخدام أخشاب الأشجار كوقود ، بالإضافة إلى

كل الجوانب ، لكى تكوّن بيوت (تلاّ نصيديّا أو تبة) butte (من الفرنسية بمعنى تل صغير) . وتستمر التعرية في التلال النصيدية لتكوّن تلال مستدقة القصة pinnacles ، والتى تختفى في النهاية مع استمرار التعرية .

IV. التصحر

تتعرض مناطق المناخ المدارى وشبه المدارى لسنوات من القحط المدمر ، يتبعها سنوات تساقط فيها أمطار غزيرة قد تؤدى إلى حدوث فيضانات . وتُظهر التسجيلات المناخية أن هناك تبادلا بين فترة تدوم لستين أو ثلاث سنوات من القحط أو ندرة المطر وفترة أخرى قد تدوم لعدة سنوات من تساقط أمطار متوسطة أو فوق متوسطة . وهذا التغير سمة دائمة مميزة للمناخ المدارى الرطب الجاف ، حيث تتكيف النباتات والحيوانات في تلك المنطقة مع هذا التغير الطبيعي في معدل سقوط الأمطار ، باستثناء واحد هو الإنسان .



شكل (23.15): خريطة توضح الساحل Sahel أو النطاق الساحلي، والذي يمتد جنوب الصحراء الكبرى في شمال أفريقيا. (After Strahler, A. and Strahler, A., 1999: Introducing Physical Geography, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

إلى سرعات 100 كم في الساعة أو أكثر، مما يزيد من قدرة الرياح على حمل الراسب معلقاً .

2. يؤدي التسخين غير المتساوي للأرض بأشعة الشمس إلى الحركة الدائمة في الغلاف الجوي، وتجزئة دوران الهواء بين خط الاستواء والأقطاب إلى أحزمة رياح تسود بها الرياح التجارية والغربية والشرقية القطبية، وإلى انحراف كل من انسيابات الهواء الشمالية والجنوبية والباردة والساخنة بين خط الاستواء والأقطاب . ويؤدي تأثير كوريوليس إلى انحراف كل من انسيابات الهواء الشمالية والجنوبية والباردة والساخنة بين خط الاستواء والأقطاب .

3. تشمل المواد التي يمكن أن تحملها الرياح الرماد البركاني والكوارتز وحببيات المعادن الأخرى مثل معادن الصلصال والمواد العضوية . ويمكن للرياح أن تحمل كميات ضخمة من الرمل والتراب .

4. تحرك الرياح حببيات الرمل بالزحف السطحي والوثب بالقرب من سطح الأرض، بينما تكون حببيات التراب معلقة عند مستويات أعلى . وتؤدي العمليات السابقة إلى فرز الراسب .

5. يقوم الهواء المنساب والمحمل بالرواسب بتعرية الأرض بطريقتي التذرية والسحج . وتؤدي العمليات إلى نشأة أحواض التذرية وأرصفتي الصحراء وتكوين الوجهرىحيات والياردانج .

6. تتكون الكثبان الرملية عندما تسبب العواصف في انحراف انسياب الهواء، حيث يترامى الرمل في جيب نتيجة انخفاض سرعة الرياح المحملة بالرمال (نطاق ظل الرياح) والانهيار على أوجه انزلاق حادة الانحدار . وتتكون الأنواع المختلفة من الكثبان وهي البرخان والمستعرضة والطولية والنجمية والقطع المكافئ (البارابولية)، كاستجابة لسرعة الرياح واستمرارية أو تغير اتجاه الرياح ووفرة الرمل.

السحب الزائد للمياه الجوفية . وقد يستخدم مصطلح التصحر بدلاً من مصطلح تدهور إنتاجية الأرض الزراعية land degradation . وقد تساعد تراكبات الرواسب في قنوات المجارى المائية وإزالة التربة بالرياح في عملية التصحر . كما قد ينشأ التصحر من تغيرات بيئية طبيعية تؤدي إلى الجفاف ، بالإضافة إلى النشاط الإنساني .

وتبدأ مظاهر التصحر الرئيسية بانخفاض مستوى الماء الجوفي وزيادة ملوحتها ، وزيادة ملوحة الأجزاء العليا من التربة (التربة السطحية topsoil)، وانخفاض إمدادات الماء السطحي ، وزيادة غير عادية في تعرية التربة وهلاك الزراعات المحلية ونفوق الماشية .

ومن المناطق التي ينتشر فيها التصحر دولة موريتانيا في شمال غرب أفريقيا ، حيث يحاول السكان أن ينظموا أنفسهم في مجموعات لمقاومة الجفاف . كما قام السكان بتشجير أماكن عديدة من الصحراء ، وتوزيع أنابيب غاز صغيرة ليستعينوا بها في طهو طعامهم بدلاً من قطع الأشجار واستخدامها كوقود . كما قامت الحكومة الموريتانية ببناء سدود وخزانات للمحافظة على المياه .

الملخص

1. الرياح انسياب أفقى للهواء مواز لسطح الكرة الأرضية الدوارة ، يمكنه حمل ونقل حببيات الراسب الجافة بالطريقة نفسها التي ينقل بها الماء الجارى الراسب ، ولكن تكون انسيابات الهواء محدودة في كل من حجم الحببيات التي يمكن أن تحملها (نادراً ما تكون أكبر من رمل خشن الحببيات) ، وعلى الاحتفاظ بالحببيات معلقة لفترة طويلة نظراً لانخفاض كثافة ولزوجة الهواء . وتكون كل انسيابات الهواء مضطربة ، وتصل الرياح

10. تشمل المعالم الأرضية في الصحارى المراوح الطميمة والبجادا والبيدمنت والجبال المنعزلة (الجزيرية) والميسات (الربوات) والتلال النضيدية والتلال مستدقة القمة ، والتي تتكون نتيجة تعرية تتابع من الطبقات الأفقية .
11. قد يتسبب تكرار حدوث القحط في انخفاض منسوب الماء الأرضي وارتفاع معدل تعرية التربة وتدمير الغطاء النباتي ، مما يؤدي إلى غزو الصحارى للمناطق المجاورة غير الصحراوية. وتؤدي زيادة الرعى والسحب الزائد للمياه الأرضية وقطع الأشجار لاستخدامها كوقود ، بالإضافة إلى بقية أنشطة الإنسان ، إلى التعجيل بحدوث التصحر.
- وتهاجر الكثبان في اتجاه الرياح ، حيث تتكون طبقات كاذبة تميل في اتجاه الرياح .
7. ترسب اللويس أساسا بالرياح من الصحارى ومن السهول الفيضية لمجارى المياه المتكونة من انصهار المثالج . وتتكون رواسب اللويس من التراب المكون في معظمه من الغرين والصلصال وبعض الرمل الناعم .
8. تكون الصحارى الحارة حوالى 30٪ من مناطق العالم ، باستثناء المناطق القطبية ، وهي مناطق تتميز بقلّة سقوط الأمطار وارتفاع درجة الحرارة وزيادة البخر ، والرياح القوية نسبياً، وغطاء نباتي غير كثيف ومتفرق .
9. تسود التجوية الفيزيائية في الصحارى ، حيث تعتبر مع الفيضانات المفاجئة والرياح عوامل تجوية مؤثرة في تلك المناطق .

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

<http://www.unccd.ch/>
<http://www.desertusa.com/>
<http://arizona.usqs.gov/Flagstaff>
<http://www.nps.gov/moja/mojadewd.htm>
<http://www.mrdowling.com/611-deserts.html>

المصطلحات المهمة

abrasion	برى (سحج)	parabolic dune	كثيب قطع مكافئ (بارابولي)
alluvial fan	مروحة طميية	pediment	بدمنت (سفع جبل)
bajada	بجادا	pinnacle	تل مستدق القمة
barchan dune	كثيب برخان (ج. برخانات)	plateau	هضبة
blowout dune	كثيب انطلاق	playa	بلايا (بحيرة جافة)
butte	بيوت (تل تضيد)	playa lake	بحيرة بلايا
Coriolis effect	تأثير كوريولي	rain shadow desert	صحراء ظل المطر
deflation	تدرية	sandblasting	سفع الرمال
desert	صحراء	sand dune	كثيب رملي
desert pavement	رصيف صحراوي	sand ripple	نيم الرمال (مويجات الرمال)
desert varnish	ورنيش الصحراء	sand sea	بحر الرمال
desertification	تصحّر	slip face	وجه انزلاق
eolian	ريحي	star dune	كثيب نجمي
flash flood	فيضان مفاجئ	transverse dune	كثيب مستعرض
inselberg	جبل منمزل (جزيري)	ventifact	وجهرية
linear dune	كثيب طولي	yardang	ياردانج (حيد ريحي)
loess	لويس		
mesa	ميسا (ربوة)		

الأسئلة

- 1- اذكر العوامل الجوية التى تجعل معظم الصحارى الحارة الكبرى فى العالم تتركز فى أحزمة تقع بين خطى عرض 20° و 30° شمال وجنوب خط الاستواء.
- 2- ما العامل الذى يحدد العمق الذى تكون التذرية مؤثرة عنده ؟
- 3- اذكر لماذا تكون تأثيرات التعرية نتيجة هبوب الرمال محصورة عموماً فى نطاق يرتفع حوالى متر ابتداء من سطح الأرض.
- 4- كيف يمكننا استنتاج اتجاه الرياح السائد فى الماضى من الشكل والتطبيقات الداخلى لكثيب رملى قديم غير نشط ، ومن وجهيحية ، ومن راسب تفرا ؟
- 5- ما حجم الحبيبات التى يمكن أن تحركها الرياح ؟
- 6- كيف يمكن التمييز بين راسب من اللويس وراسب رماد بركانى لهما حجم الحبيبات نفسه ؟
- 7- لماذا تميل منحدرات التلال فى المناطق الجافة لأن تكون حادة وشديدة الانحدار عن تلك التى توجد فى المناطق الرطبة ؟
- 8- اذكر الارتفاعات التى يمكن أن تُحمَل إليها حبيبات الرمل والتراب فى الغلاف الجوى، و اشرح أوجه التشابه والاختلاف بينهما.
- 9- اذكر أسماء ثلاثة أنواع من الكتيبان الرملية مع توضيح علاقتها باتجاه الرياح.
- 10- ما معالم الأرض فى الصحراء التى يمكنك أن تعتقد أنها تكونت أساساً بواسطة المجارى المائية، مع إسهامات ثانوية من عمليات الرياح ؟
- 11- أيهما أفضل : التطبيق المتقاطع أم اتجاه شكل الكتيب على الخريطة لاستنتاج اتجاه الرياح التى كونت كتيباً برخانياً؟ ولماذا ؟
- 12- اذكر بعض مظاهر التصحر ، وما العوامل التى تساعد على عملية التصحر ؟
- 13- كيف يتكون اليبدمنت ؟
- 14- كيف يمكن أن تختلف التجوية فى الصحراء عنها فى المناخات ذات الرطوبة الأعلى ؟

الفصل

16

الزلازل وتركيب الأرض

ا. الزلازل

أ. نشأة الزلازل

ب. دراسة الزلازل

1. السيزموجراف (مسجل الزلازل)

ج. الموجات الزلزالية

1. الموجات الأولية

2. الموجات الثانوية

3. الموجات السطحية

د. قياس شدة وقدر الزلزال

1. شدة الزلزال

2. قدر الزلزال

هـ. الدمار الناشئ عن الزلزال

و. تحديد نوع التصدع من نتائج الزلزال

اا. توزيع الزلازل حول العالم

ااا. الزلازل وتكتونية الألواح

أ. الأحزمة الزلزالية عند حدود الألواح

1. الزلازل الضحلة البؤرة عند الحواف المتباعدة

2. الزلازل الضحلة البؤرة عند حواف الصدوع الناقلة

3. الزلازل العميقة البؤرة عند الحدود المتقاربة

4. الزلازل الضحلة البؤرة داخل الألواح

vi. توقع الزلازل

أ. توقع الزلازل على أساس إحصائي

ب. توقع الزلازل على أساس فيزيائي

ج. توقع الزلازل على أساس بيوفيزيائي

v. استكشاف باطن الأرض باستخدام الموجات الزلزالية

أ. انتقال الموجات الزلزالية في الأرض

ب. اكتشاف التركيب الداخلي للأرض

1. القشرة

2. الوشاح

3. اللب

4. اللب الداخلي

ج. الطبقات مختلفة الخصائص الفيزيائية في الوشاح

VI. الجاذبية الأرضية وتوازن القشرة الأرضية

أ. قاعدة توازن القشرة الأرضية

الشموع والمصابيح لتشتعل النيران لمدة ستة أيام . وقبل مرور ساعة على هذا الحدث الجلل اهتزت مدينة لشبونة مرة أخرى بفعل زلزال ثان أكثر قوة وعنفاً ولكن مدته أقل من الزلزال الأول . وقد اندفع الكثير من السكان الباقين على قيد الحياة والمذعورين إلى الشاطئ الأكثر أمناً ، ولكن اندفعت أمواج البحر التي سببها الزلزال والتي وصل ارتفاعها إلى أكثر من عشرة أمتار لتحصد أرواح السكان الفارين . كما تدفقت المياه لتغطي اليابسة لمسافة وصلت إلى أكثر من نصف كيلومتر وحملت القوارب والسفن المحملة بالبضائع . وعندما تراجعت مياه البحر سحبت معها البشر والحطام إلى البحر . ثم تعرضت لشبونة في مساء نفس اليوم لهزة أخرى حدثت على بعد 550 كيلومتر من مدينة فاس بالمغرب تسببت في الكثير من الإصابات ، بالإضافة إلى التدمير الشديد لمناطق شمال أفريقيا . حيث دمرت مدينة فاس وغيرها من المدن الأصغر في المغرب والجزائر . وقد أدت أول هزتين أرضيتين في لشبونة إلى قتل حوالى سبعين ألف نسمة وحطمت حوالى 90٪ من المباني ، بينما تسبب الهزة الثالثة سوى دعر السكان الناجين . وقد امتد تأثير زلزال لشبونة لمدى أكبر من مجرد تدمير المدينة ، حيث أفادت الدراسات أن أكثر من 3٪ من سطح الأرض قد اهتز ، وتعرضت المباني الواقعة على بعد حوالى 600 كيلو متر من بؤرة الزلزال للتدمير ، كما ارتطمت أمواج البحر العاتية الناشئة عن الزلزال بشواطئ البرتغال وشمال أفريقيا والجزر البريطانية وهولندا . وتدل القياسات الحديثة أن هذا الزلزال ربما كان يصل إلى حوالى 8.7 على مقياس ريختر .

حين تحدثت الزلازل تتحرك الأرض تحت أقدامنا ، فتتطلق الطاقة من باطنها وتعمل على تغيير شكل سطح الأرض وتدمر المدن وتقتل أعدادا كبيرة من البشر . وقد تكون بعض الزلازل عنيفة لدرجة أن الطاقة الناشئة عنها تساوى الطاقة المنبعثة من آلاف القنابل الذرية المنفجرة في الوقت نفسه . ومن المعروف أن الزلازل لا تسبب قتل البشر مباشرة ، وإنما تعمل على هدم المباني التي تؤدى إلى قتلهم . ويلاحظ أن معظم التقارير القديمة عن الزلازل غير كاملة ، حيث تورد تلك التقارير تفسيرات للزلازل ، بدلاً من وصفها بدقة . وتعتمد معظم التفسيرات القديمة للزلازل والتي وردت قبل أكثر من 2000 عام على أفكار أرسطو ، والتي كانت تقوم على أساس أن الزلازل تحدث نتيجة الرياح المندفعة تحت سطح الأرض .

ولم تطبق الطريقة العلمية في دراسة الزلازل حتى وقت قريب . ففي القرن الثامن عشر كانت البرتغال ، وخاصة مدينة لشبونة العاصمة ، بلداً غنياً ، ولكن بدأت الأحوال تسوء فيه بسبب فعل الزلازل . ففي صباح أول نوفمبر عام 1755م ، وبينما كان هناك احتفال دينى في مدينة لشبونة والكنائس مملئة بالمحتفلين ، وفي حوالى الساعة التاسعة وأربعين دقيقة صباحاً ، بدأ صوت كالرعد من تحت الأرض ، أعقبه هزة أرضية عنيفة استمرت لمدة دقيقتين أو ثلاث دقائق سببت دماراً واسعاً للمنازل والكنائس والمباني العامة في تلك المدينة التي كان يقطنها حوالى ربع مليون نسمة . حيث تهدمت معظم المباني في الطرقات الضيقة لتقتل آلاف البشر المحاصرين ، كما سقطت الستائر على



شكل (1.16): انهيار بعض المباني بالقاهرة نتيجة الزلزال الذى تعرضت له مدينة القاهرة الكبرى بمصر يوم 12 أكتوبر عام 1992م.

(1.16)، كما امتد تأثير الزلزال إلى بعض المباني الأثرية الإسلامية بالقاهرة.

وتحدث الزلازل عموماً نتيجة انطلاق طاقة المرونة المخزنة في باطن الأرض. وتوجد معظم الزلازل عند حدود الألواح أو بالقرب منها، وهى الحدود التى سبق تحديدها أثناء مناقشة تكتونية الألواح

وقد تعرضت مدينة القاهرة الكبرى (محافظات القاهرة والجيزة والقليوبية) في تمام الساعة الثالثة عصر يوم 12 أكتوبر عام 1992م لزلزال استمر لحوالى دقيقة تقريباً وبلغت شدته حوالى 5.8 على مقياس ريختر. وقد تسبب هذا الزلزال في قتل حوالى 500 شخص وتدمير عديد من المنازل بالأحياء المختلفة (شكل

على امتداد المنضدة . وتعنى كلمة زلزال **earthquake** اهتزاز الأرض وتذبذبها . وقد تحدث الزلازل نتيجة نشاط بركاني أو تصادم النيازك الساقطة من السماء بسطح الأرض أو الانهيارات الأرضية تحت سطح البحر أو الانفجارات النووية ، ولكن أكثر أسباب الزلازل شيوعاً هو التحرك المفاجئ للأرض على امتداد الصدوع . والصدع هو كسر في الأرض تتحرك الصخور على جانبيه بمحاذاة بعضها البعض .

وتعتبر نظرية الارتداد المرن أكثر النظريات قبولاً لتفسير أسباب حدوث الزلازل . وقد وُضعت هذه النظرية بناء على الدراسة التفصيلية لصدع سان أندرياس والذي حطم مدينة سان فرانسيسكو عام 1906م ، وهو صدع مضرى الانزلاق بين لوح شمال أمريكا ولوح المحيط الهادئ .

أ. نشأة الزلازل

يبدو أن التحرك المفاجئ على امتداد الصدوع هو السبب في معظم الزلازل ، إلا أن الأمر ليس بتلك البساطة ، فبعض الزلازل قد تكون أقوى ملايين المرات من زلازل أخرى . ويرجع السبب في ذلك إلى أن الطاقة نفسها التي تنطلق نتيجة آلاف الانزلاقات البسيطة والزلازل الضعيفة ، يمكن أن تحتزن في حالة أخرى لتنتقل في زلزال واحد ضخم . فطبقاً لنظرية الارتداد المرن **elastic rebound theory** فإنه إذا لم تنزلق أسطح الصدع بسهولة بمحاذاة بعضها البعض ، فإن الطاقة قد تحتزن في أجسام الصخر المشوهة تشويهاً مرناً مثلما يحدث عند ضغط زنبرك من الصلب . وعندما يتزلق الصدع أخيراً ، فإن الجسم الصخري المشوه تشويهاً مرناً يترد إلى شكله الأصلي .

ولتخيل ما يحدث في زلزال ما ، وطبقاً لتلك النظرية ، فمعد وجود صدع بين كتلتين من صخور

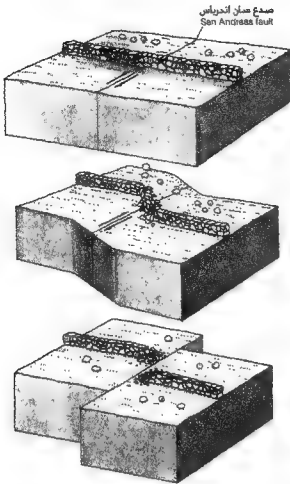
في الفصل الأول . كما يوجد الكثير من الزلازل أيضاً في المناطق المستقرة تكوتياً بعيداً عن حدود الألواح في القشرة الأرضية ، ولكنها تكون قليلة الحدوث عادة .

وفي الحقيقة ، فليست الزلازل شراً دائماً . حيث تعتبر الزلازل وسيلة مهمة من وسائل الحصول على المعلومات عن طريقة عمل الأرض . كما تستخدم الزلازل لدراسة الأجزاء الداخلية من الأرض أيضاً ، حيث إن الطريقة التي نتميز بها الأرض عقب الهزات الكبيرة تعتمد أساساً على صفات ونوعية الصخور داخل الأرض . وتشبه هذه الطريقة ، استخدام الطبيب للأشعة السينية لفحص جسم الإنسان من الداخل ، فالزلازل هي أدوات نستخدمها لدراسة الأرض من داخلها . وسنتعرض في هذا الفصل تعريف الزلازل ، وأسباب وأماكن حدوثها وشدها ، ولماذا تحدث في مناطق بعينها ، بالإضافة إلى استخدام الزلازل في دراسة باطن الأرض .

1. الزلازل

عندما تمتاز الأرض ، فكأنها قد صُربت بمطرقة ضخمة . ويرجع السبب في هذا الاهتزاز إلى الانطلاق المفاجئ للطاقة المختزنة في الصخور عندما تزيد عن حد المرونة وتشوه الصخور بالكسر . وتنطلق الطاقة عندئذ في ثلاث صور (1) طاقة اهتزاز (موجات زلزالية) ، (2) طاقة وضع تحرك بسببها أجزاء من الأرض ، (3) طاقة حرارية نتيجة الاحتكاك . وكلما زادت كمية الطاقة المنطلقة كلما زادت قوة الزلزال .

ويمكن فهم كيفية حدوث الزلازل ، بأن نقوم بطرق سطح منضدة خشبية عند أحد طرفيها بينما نضع يدنا على طرفها الآخر ، فإننا نشعر بحدوث ذبذبات نتيجة انتقال الطاقة التي سببها طرق سطح المنضدة وانتقالها إلى اليد بواسطة الذبذبات المرنة خلال الخشب



القشرة الأرضية ، وإذا لم تنزلق الكتلتان على سطح الصدع بالنسبة لبعضهما البعض بسهولة ، فإن الاحتكاك بين الكتلتين قد يتسبب في قفل locking تلك الصخور ببعضها ، كما يمنع الحركة على امتداد الصدع لسنوات أو حتى عدة عقود (شكل 2.16) . وخلال عدة سنوات ، ونتيجة استمرار عملية دفع كتل الصخور في اتجاهين متضادين ، تحتزن الصخور الموجودة على امتداد الصدع الطاقة الناتجة من حركة الألواح ، حيث تكون تلك الصخور مجهددة ومشوهة تشوهاً مرناً elastically deformed ، أو تنحني ببطء . ويتم في النهاية التغلب على الاحتكاك ، عندما تصل الصخور إلى حد المرونة elastic limit وتتكسر . ويؤدي تكسر الصخور إلى انطلاق طاقة المرونة المتراكمة في الصخور ، والتي تتحرك فجأة على امتداد الصدع ، مما يؤدي إلى حدوث الزلزال . ويوضح شكل (2.16) أن كتلتا الصخر قد ارتدتا بعد حدوث الزلزال، أي عادتا إلى شكلهما الأصل قبل التشوه واختفى انحناء الصخر .

شكل (2.16): زلزال حدث نتيجة لانطلاق مفاجيء للطاقة . وقد تم وضع الشكل بناءً على دراسات مساحية بالقرب من صدع سان أندرياس ، كاليفورنيا ، قبل وبعد الحركة المفاجئة التي سببت زلزال 1906 م . ويوضح الشكل حائط من الحجر يقطع الصدع ، وقد انحنى الحائط ببطء نتيجة تشوه الصخر تشوهاً مرناً . وقد ابتعد جزءا الحائط عن بعضها سبعة أمتار بعد الصدع ، كما أن كتلتا الصخر قد ارتدتا بعد حدوث الزلزال ، أي عادتا إلى شكلهما الأصل قبل التشوه واختفى انحناء الصخر .

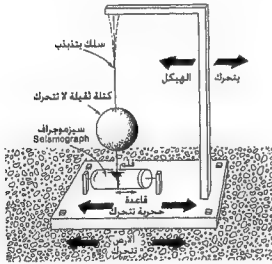
(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وتقع معظم الزلازل في صخور الغلاف الصخري القصفة . وكما أوضحنا في الفصل العاشر فإن التقصف brittleness هو قابلية المواد الصلبة لأن تتكسر نتيجة زيادة الإجهاد عن حد المرونة . وفي الأعماق البعيدة عن سطح الأرض تكون درجات الحرارة والضغط عاليين مما يسبب تشوه الصخور

وتحدث حركة كتلتى الصدع من مجموعة من التحركات القصيرة التي تبدأ عند البؤرة (الزلزالية) focus (نقطة الكسر الأولى) وتتحرك على امتداد الصدع ، حيث تنشأ من الطاقة موجات زلزالية تنتشر للخارج من البؤرة الزلزالية لتسبب اهتزاز الأرض . وتقع البؤرة الزلزالية في أعماق الأرض وتحت سطح الأرض ، وهي تمثل النقطة التي تبدأ عندها حركة الصدع وانزلاق الكتلتين . وتسمى النقطة التي تقع فوق البؤرة الزلزالية مباشرة فوق سطح الأرض بالمركز السطحي للزلزال epicenter (شكل 3.16) . وعموماً ، فإنه من الأجدر عند وصف بؤرة الزلزال تحديد المركز السطحي للزلزال وعمقه .

تسجيل حركة الأرض الناشئة عن وصول الموجات الزلزالية إليها .

ومعظم أجهزة السيزموجراف تستفيد من ظاهرة القصور الذاتي **inertia** ، وهى مقاومة كتلة كبيرة ثابتة للحركة المفاجئة . فإذا علقنا كتلة من الحديد فى زنبرك خفيف ثم حركنا الزنبرك فجأة ، فإننا نلاحظ أن كتلة الحديد تبقى ثابتة تقريباً نتيجة القصور الذاتي ، بينما يتمدد الزنبرك ، وهذه هى القاعدة المستخدمة فى السيزموجراف . ويمكن ملاحظة تلك الظاهرة عند توقف سيارة فجأة ، حيث يستمر جسم راكب السيارة فى الحركة للأمام . وتقاس الحركة الرأسية للموجات الزلزالية بتعليق كتلة ثقيلة فى زنبرك مثبت فى إطار يستقر على الأرض ، وعندما تهتز الأرض يتمدد الزنبرك وينكمش بينما تبقى الكتلة المعلقة ثابتة تقريباً بسبب القصور الذاتي . وتسجل الإزاحة الرأسية على شريط من الورق أمامه قلم ، وهذه الإزاحة عبارة عن الفرق بين حركات الإطار والكتلة المعلقة .



شكل (4.16): عمل سيزموجراف seismograph بسيط .

عندما تتحرك الأرض يتحرك هيكل السيزموجراف ويندبذبت بالنسبة للسلك المعلق منه ، بينما تبقى الكتلة الثقيلة المعلقة والقلم المثبت منها ثابتة تقريباً ، ويرسم القلم على الورق أسفله يتناسب مع حركة الأرض .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition, WCB/McGraw Hill, Boston).

تشوهاً لدنا . ولذلك ، تشبه الصخور عند تلك الأعراق المعجون ، ويتغير شكلها تغيراً دائماً يبقى بعد زوال القوى التى تسبب التشوه ، ولذلك فإن الزلازل ظاهرة توجد فى الجزء الخارجى القصف من القشرة الأرضية .



شكل (3.16): البؤرة الزلزالية focus هى موقع الحركة الأولى على الصدع ، وهى مركز انطلاق الطاقة ، أما المركز السطحي للزلزال epicenter فهو النقطة التى تقع فوق البؤرة الزلزالية مباشرة فوق سطح الأرض .

ب. دراسة الزلازل

يسمى العلم الذى يهتم بدراسة الزلازل وتركيب الأرض باستخدام الموجات الزلزالية بعلم الزلازل **seismology** وهى كلمة مشتقة من المصطلح اليونانى القديم **seismos** بمعنى زلازل .

1. السيزموجراف (مسجل الزلازل)

يسمى الجهاز المستخدم فى تسجيل هزات وذبذبات الأرض الناتجة عن الزلازل بالسيزموجراف (مسجل زلازل) **seismograph** . ويعرف السجل الذى نحصل عليه من السيزموجراف بالسيزموجرام (السجل السيزمى) **seismogram** ، وهو من أهم الوسائل لدراسة الزلازل والكشف عن باطن الأرض . ويمثل السيزموجراف للجيولوجى ما يمثله التليسكوب لعالم الفلك ، حيث يعتبر وسيلة لرصد الأماكن التى لا يمكن الوصول إليها . والطريقة المثلى لتسجيل ذبذبات الأرض ، هى أن نضع السيزموجراف فوق جزء ثابت من الأرض ، ليهتزا معا كنظام واحد عند وصول الموجات الزلزالية إليها ، حيث يمكن

فإن المواد التي تمر خلالها تلك الموجات تتمدد وتضغط (أي تتحرك للأمام والخلف) نتيجة حركة الموجات خلالها، وتعود إلى شكلها الأصلي بعد مرور الموجات. وكلما زادت الكثافة والمقاومة للتضاغط، كلما زادت سرعة الموجات الزلزالية التي تمر في النظام الذري الداخلي للمواد. وتبلغ سرعة الموجات الأولية في الجزء العلوي من القشرة الأرضية حوالي 6 كم/ الثانية، حيث تزداد كثافة الصخور، بينما تنخفض السرعة في الماء إلى حوالي 1.5 كم/ الثانية. وتستطيع الموجات الأولية التحرك في الهواء، حيث تشبه موجات الصوت كما ذكرنا سابقاً.

2. الموجات الثانوية

تسلي الموجات الأولية الموجات الثانوية **secondary waves** أو موجة إس (S wave) في الوصول إلى السيزموجراف. وتعرف الموجات الثانوية بأنها موجات قص **shear waves** حيث إنها موجات مستعرضة تسبب اهتزاز جزيئات المواد التي تمر خلالها في اتجاه عمودي على اتجاه انتشارها. وتشبه حركة الموجة الثانوية حركة الحبل الذي يهز أحد طرفيه لأعلى وأسفل (شكل 5.16 ب). وتسبب تلك الموجات في حدوث إجهادات قص في المواد التي تمر خلالها، حيث تشوه المواد التي تمر خلالها تلك الموجات ولا تعود إلى شكلها الأصلي إذا تعدى الإجهاد حد المرونة. وحيث أن معامل تماسك السوائل والغازات يساوي صفراً ولا تملك السوائل والغازات تلك المرونة التي ترتد بها إلى الشكل الأصلي، فإن الموجات الثانوية (موجات القص) لا تنتقل إلا في المواد الصلبة فقط ولا تمر في السوائل أو الغازات. وتبلغ سرعة الموجات الثانوية في صخور الجزء العلوي من القشرة الأرضية (مثل صخر

كما تقاس الإزاحة الأفقية بطريقة مشابهة، حيث تُعلق كتلة ثقيلة في مفصلة مثبتة في الإطار. ويمكن للسيزموجراف الذي علقت كتلته الثقيلة في إطار يتحرك، من تسجيل الحركات الأفقية للأرض (شكل 4.16). وتستخدم في أجهزة السيزموجراف الحديثة تكنولوجيا إلكترونية متقدمة تعمل على تكبير ذبذبات الأرض قبل تسجيلها.

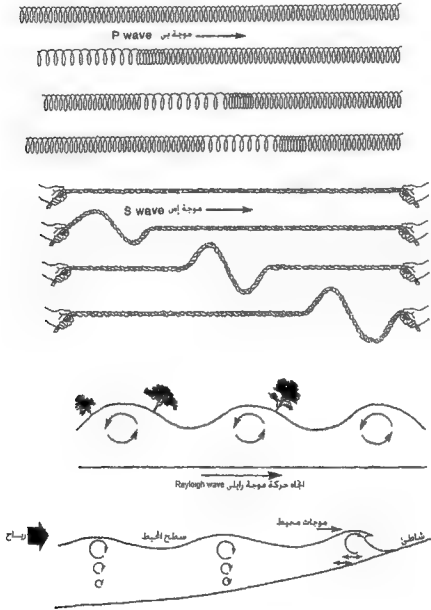
ج. الموجات الزلزالية

تطلق الأرض عندما تهتز طاقة في صورة موجات زلزالية **seismic waves**، تنطلق من البؤرة الزلزالية عبر القشرة الأرضية لتصل إلى السيزموجراف على هيئة موجات داخلية (جسمية) **body waves** تنتقل في جسم الأرض بالكامل. وتتداخل الموجات الداخلية (الجسمية) المنعكسة من سطح الأرض مع تلك القادمة من أسفل لتكون موجات سطحية **surface waves** تتحرك بالقرب من سطح الأرض فقط. والموجات الداخلية هي الأسرع، وتشمل موجات أولية وموجات ثانوية.

1. الموجات الأولية

الموجة الأولية **primary wave** أو موجة بي (P wave) هي الموجة الأسرع والأسبق في الوصول إلى محطة التسجيل. وتحرك الموجات الأولية في نظام دفعي-جذبي **push-pull fashion** للذبذبات، حيث تتبادل التضاضعات (دفع) مع التخلخلات (جذب) مثل موجات الصوت في الهواء، وتشبه الموجات الأولية في حركتها لعبة السلك الزنبركي التي تشد من طرف واحد (5.16 أ). وتحرك الموجات الأولية في جميع المواد الصلبة والسائلة والغازية ولكنها لا تتحرك في الفراغ. وتسبب الموجات الأولية في دفع أو جذب جزيئات المادة في اتجاه حركة الموجة. وهكذا

الجرانيت) حوالي 3.5-4 كم/ الثانية ، بينما تتوقف تلك الموجات الثانوية الرأسية والأفقية اهتزاز سطح الأرض الموجات عند مرورها في الماء. وتسبب حركات وبالتالي حدوث دمار للمباني .



شكل (5.16): أنواع الموجات الزلزالية:

- موجات بى وتنشأ من حركة تضغط وتمدد لفات الزنبرك
- موجات إس وتنشأ من الحركة لأعلى وأسفل عمودية على اتجاه الحركة ، وهي تشبه حركة الحبل الذي يهتز أحد طرفيه لأعلى ولأسفل .
- موجات رايلى Rayleigh waves وتحدث في هيئة دورانية (إهليجية) إلى الخلف .
- حركة موجات الماء الناشئة عن الرياح تكون دورانية أيضا ولكن إلى الأمام.

ter Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, (Boston).

الداخلية (الجزئية) ، حيث تصل تلك الموجات إلى محطة الرصد بعد الموجات الأولية والثانوية.

موجات لف : يمكن تعرف موجات لف على السيزموجرام ، وهى الموجات التى تعرف عليها عالم الرياضيات البريطانى لف A. E. H. Love . وتشبه حركة تلك الموجات حركة الموجات الثانوية ماعدا أنها تنتقل من جانب إلى آخر فى مستوى أفقى تقريباً مواز لسطح الأرض . وكما هو الحال فى موجات القص S ، تكون حركة الجزئيات بالاهتزاز أو القص فى اتجاه عمودى على اتجاه الحركة للأمام (شكل 5.16 ب) ، ولكن فى مستو مواز لسطح الأرض (يمتد الجبل من اليمين إلى اليسار) . وعموماً تنتقل موجات لف أسرع من موجات ريلى ولا تنتقل موجات لف خلال الماء أو الهواء مثل موجات إس .

موجات ريلى : سميت تلك الموجات باسم العالم البريطانى لورد ريلى Lord Rayleigh ، وتتحرك تلك الموجات فى حركة دورانية إهليلجية (بيضاوية) للخلف (شكل 5.16 ج) ، مثل حركة جزيئات الماء فى الموجات الناشئة بواسطة الرياح ، ماعدا أن حركة الأمواج فى الماء تكون دورانية للأمام (شكل 5.16 د) . ويتسبب الاهتزاز بواسطة موجات ريلى فى حركة رأسية وأخرى أفقية ، وكلما كانت بؤرة الزلزال أقرب إلى السطح ، زادت طاقة موجات إس و بى والتى تضرب السطح ، وبذلك تزداد طاقة موجات ريلى . وتنتقل موجات ريلى فى المواد الصلبة والماء .

تحديد موقع الزلزال: تنتقل الموجات الزلزالية المختلفة بسرعات مختلفة ، ولذلك فإنها تصل إلى السيزموجراف فى أزمنة مختلفة . ويوضح شكل (6.16) الأنماط المميزة والمسجلة للموجات الزلزالية المختلفة . وأول الموجات الزلزالية وصولاً إلى السيزموجراف وأسرعها هو الموجات الأولية التى

وتسلك الموجات الزلزالية الداخلية (الجزئية) سلوك موجات الصوت والضوء ، فى أنها يحتاجان لوسط ينتقلان خلاله ، وكذلك لأن لها القدرة على الانعكاس reflection والانكسار refraction . فالموجات الداخلية تنعكس على عديد من الأسطح الفاصلة بين الأوساط الصخرية داخل الأرض ، كما أنها تنعكس عندما تتغير سرعة الموجات نتيجة انتقالها من وسط إلى وسط آخر مختلف فى الكثافة ، حيث تغير تلك الموجات مسارها . كما قد يحدث التغير فى سرعة الموجات وانكسارها إما بشكل تدريجى أو مفاجئ .

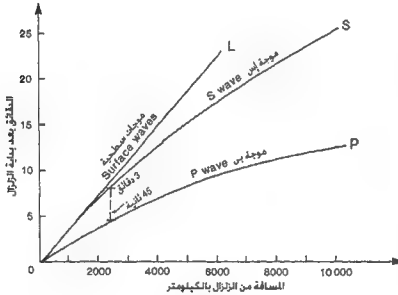
وتعتمد سرعة الموجات الداخلية على كثافة الوسط الذى يمر خلاله تلك الموجات . فإذا كان تركيب الأرض متجانساً وكانت الكثافة تزداد تدريجياً مع العمق نتيجة زيادة الضغط ، فإن الانكسار يسبب انحناء مسار الموجات الزلزالية . وقد أوضحت القياسات أن مسار الموجات يكون منحنيًا فعلاً نتيجة الانكسار التدريجى ، كما أن الموجات الزلزالية تنعكس أيضاً وتنعكس نتيجة وجود عدة نطاقات تختلف فيها الكثافة بشكل مفاجئ ، مثل الحد الفاصل بين اللب والشاح.

3. الموجات السطحية

تشمل الموجات السطحية التى تنتقل عبر سطح الأرض أو بالقرب منه عدة أنواع ، أهمها: موجات لف وموجات ريلى . وتنشأ الموجات السطحية نتيجة تداخل الموجات الداخلية (الجزئية) والمنعكسة من سطح الأرض مع تلك القادمة من أسفل ، مما يسبب اضطراب السطح . ويمكن تمثيل هذه الأنواع من الموجات الزلزالية إذا ألقينا بحجر فى الماء ، ولاحظنا الموجات الصغيرة الدائرية التى تنشأ حول نقطة سقوط الحجر (والتي تشبه المركز السطحي للزلزال) . وتعرف كل من موجات لف وموجات ريلى بموجات - L (long waves) لأنها موجات طويلة وتكون الموجات السطحية أبطأ عموماً من الموجات



شكل (6.16): السجل الزلزالي لزلزال تايوان سنة 1967م ، والذي كانت شدته 6.2 مسجلا في بيركيلي - كاليفورنيا على بعد 6300 ميل . ويوضح السجل الموجات التي وصلت في البداية من نوع P ثم يليها S ثم الموجات السطحية ، وهي آخر الموجات وصولا إلى السيزموجراف .



شكل (7.16): العلاقة بين الزمن والمسافة للموجات الزلزالية كما توضحها منحنيات زمن الانتقال - distance - time . ويلاحظ أن الفرق في زمن الوصول بين الموجات P و S هو ثلثات دقائق و45 ثانية ، وهي تساوي - كما يظهر على الشكل الذي يمثل زلزالا في روسيا عام 1909م - حوالي 2250 كم .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

أبطأ الموجات الزلزالية . كما أنها تنتقل عبر مسار أطول على امتداد سطح الأرض .

وقد تمكن العاملون في مجال الزلازل من جمع عدد ضخم من النتائج خلال السنوات الماضية استخدموها في تحديد متوسط زمن انتقال موجات إس وإس لأي مسافة . كما عملت منحنيات زمن الانتقال - time -

تنتقل بسرعة تبلغ ضعف الموجات الثانوية تقريبا ، التي تليها في الوصول . وتنتقل كل من موجات إس وموجات إس مباشرة من بؤرة الزلزال إلى السيزموجراف عبر جسم الأرض الداخلي . وآخر الموجات وصولا إلى السيزموجراف هو الموجات السطحية (موجات لف ثم موجات ريلي) حيث إنها

الذى يوضح المسافة من بؤرة الزلزال ، فإنه يتم تحديد المسافة بين السيزموجراف والمركز السطحي للزلزال . ويرسم بعد ذلك على الخريطة دائرة يساوى نصف قطرها المسافة التى تم الحصول عليها من منحنيات زمن الانتقال حول كل موقع من مواقع السيزموجراف (شكل 8.16) . وتحديد نقطة تقاطع الدوائر الثلاثة موقع المركز السطحي للزلزال . وجدير بالملاحظة أنه لا بد من استخدام ثلاثة مواقع للسيزموجراف على الأقل ، لأن استخدام موضعين فقط يحدد إمكانية وجود مركزين سطحيين للزلزال ، بينما يؤدى استخدام موقع واحد للسيزموجراف إلى إمكانية وجود عدد لا نهائى من مواقع المراكز السطحية للزلزال . وتستخدم حاليا الحاسبات الآلية في تحديد مواقع المراكز السطحية للزلزال ، حيث يتم استخدام عديد من مواقع السيزموجراف بهدف الحصول على نتائج أدق .

د. قياس شدة وقدر الزلزال

إن تحديد موقع الزلازل هو خطوة أولى فقط لفهم تلك الزلازل ، ولكن لا بد أن يحدد علماء الزلازل قوة الزلزال . ويتم هذا التحديد بطريقتين: الأولى وهى شدة الزلزال *intensity* وهى تقييم نوعى ووصفى لأنواع الدمار الناشئ عن زلزال ما ، والطريقة الثانية هى قدر الزلزال *magnitude* وهى قياس كمى المقدار الطاقة المنطلقة من زلزال ما . وتعدنا كل من الطريقتين بتتائج هامة عن الزلازل وتأثيرها ، حيث يمكن استخدام هذه المعلومات عن الزلازل في دراسة ومحاولة توقع زلازل مستقبلية .

1. شدة الزلزال

شدة الزلزال *intensity* هى قياس نوعى ووصفى للدمار الناتج عن زلزال ما ورد فعل الناس لها . وقد استخدم الجيولوجيون الشدة منذ منتصف القرن التاسع عشر كتقدير تقريبي لحجم وقوة زلزال ما .

distance curves والتى توضح أنه كلما زادت المسافة بين السيزموجراف والمركز السطحي للزلزال *epicenter* ، زاد الفرق بين زمن وصول موجات بى وموجات إس (شكل 7.16) .

كما يوضح شكل (8.16) أنه يمكن تحديد المركز السطحي لأى زلزال باستخدام منحنيات زمن الانتقال ، ومعرفة زمن وصول كل من موجات S و P عند أى ثلاثة مواقع للسيزموجراف أو أكثر . ويعطى ناتج طرح زمن وصول أول موجة أولية من زمن وصول أول موجة ثانوية فرق الزمن المنقضى بين وصول الموجتين عند كل موقع سيزموجراف . وبإسقاط فرق الزمن من المواقع المختلفة على منحنيات زمن الانتقال ورسم خط مستقيم لأسفل إلى المحور

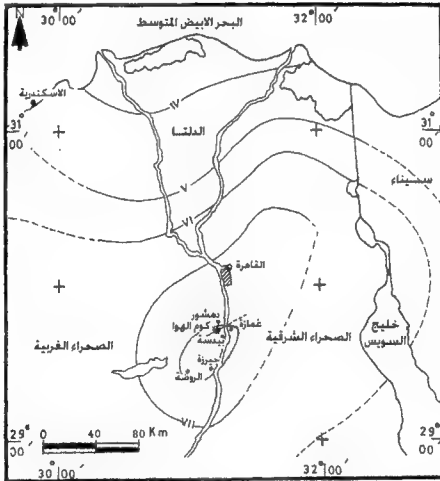


شكل (8.16): تحديد مكان مركز الزلزال . حيث يوضح الفرق في زمن وصول موجات S-P نصف قطر قدره 164 كم من ميسوري و 236 كم من سانت لويس و 664 كم من كولمبس . وتقاطع الدوائر الثلاثة ذات أنصاف الأقطار السابقة في نيومديد-ميسوري ، وهى مركز الزلزال .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill. Boston).

وعموماً ، وعلى الرغم من حقيقة أن الزلازل الكبيرة يسبب دماراً أكبر من الزلازل الصغيرة ، إلا أن هناك عدداً من العيوب في استخدام ذلك المقياس . حيث يعتمد الدمار على البعد عن المركز السطحي للزلازل (شكل 9.16) وعمق بؤرة الزلازل والكثافة السكانية وجيولوجية المنطقة المتأثرة بالزلازل ونوعية المواد المستخدمة في البناء وطريقة البناء ومدة الاهتزاز . وبالإضافة إلى ذلك ، فإن تقدير حجم الدمار يكون موضوعياً ، بمعنى أن بعض الناس قد يضحخم حجم الدمار سواء عن قصد أو عن غير قصد ، إلا أن الميزة

وأكثر مقياس الشدة استخداماً في الولايات المتحدة والعالم مقياس شدة ميركالي المعدل **Modified Mercalli Intensity Scale** . وهو مقياس مقسم إلى اثني عشر قسماً ، تكتب بالأرقام الرومانية ، ويبدأ برقم I والذي يعبر عن الزلازل التي لا يشعر الناس بها ، وينتهي برقم XII والذي يعبر عن حدوث دمار شامل تقريباً . وهو مقياس معدل لمقياس العالم الإيطالي ميركالي **G. Mercalli** ، والذي وضعه سنة 1902م وتم تعديله عام 1931م في الولايات المتحدة الأمريكية (جدول 1.16) .



شكل (9.16): خريطة توضح شدة الزلازل الذي تعرضت له مدينة القاهرة الكبرى عصر يوم 12 أكتوبر عام 1992م . ويلاحظ أن شدة الدمار تقل كلما ابتعدنا عن المركز السطحي للزلازل عند قرية كوم الهوا بالقوم .

(After Sabri, A. M. et al., 1993: Koam Al-Hawa earthquake, 12 October, 1992, Egypt: A damage in the Nile Valley. Ain Shams Sci. Bull., (Special Issue), 8-22).

ويتحدد قدر الزلزال بقياس اتساع أكبر موجة زلزالية تم تسجيلها على السيزموجرام. ونظراً لأن الزلازل تختلف كثيراً في قوتها، فإن اتساع الموجات المتولدة يتفاوت آلاف المرات تبعاً لهذا الاختلاف. ولاستيعاب هذا التفاوت الكبير، استخدم ريختر مقياساً لوغاريتمياً (للأساس 10) للتعبير عن قُدر الزلزال. فإذا تضاعف اتساع موجة الزلزال عشر مرات، فإن ذلك يقابله زيادة قدرها وحدة واحدة على مقياس ريختر. فمثلاً، اتساع أكبر موجة زلزالية لزلزال قدره 6، تكون عشرة أضعاف اتساع الموجة الناتجة عن زلزال قدره 5، وتزيد مائة مرة عن زلزال قدره 4، وألف مرة عن زلزال قدره $10 = 3 \times 10 \times 10$ (1000).

الكبرى لاستخدام مقياس شدة الزلزال هو أنه لا توجد حاجة لاستخدام أجهزة خاصة.

2. قدر الزلزال

عند مقارنة الزلازل كمياً ببعضها، فإننا يجب أن نستخدم مقياساً مستقلاً عن مقياس شدة الزلزال يقيس كمية الطاقة المنطلقة عن الزلزال. وقد قدم تشارلز ريختر Charles F. Richter عام 1935 م من معهد كاليفورنيا للتقنية هذا المقياس، وهو قدر الزلزال **magnitude**، أي الكمية الكلية للطاقة المنطلقة من زلزال ما عند نقطة مصدوره. ويعرف هذا المقياس بمقياس ريختر لقدر الزلازل **Richter magnitude scale**. ويبدأ هذا المقياس من قدر 1، بينما يكون مفتوح النهاية.

جدول (1.16): شدة الزلازل وتكرارها على مستوى الكرة الأرضية والدمار الناشئ عنها

مقياس ريختر لقدر الزلزال	التكرار في السنة	مقياس الشدة (ميركالي المعدل)	الأثر في المناطق المأهولة
> 3.4	800000	I	تسجيله المرصود فقط
3.5-4.2	30000	II و III	يشعر به بعض الناس داخل البيوت
4.3-4.8	4800	IV	يشعر به كثير من الناس وتهتز الشبائيك
4.9-5.4	1400	V	يشعر به كل الناس، وتتكرر الأطباق، وتهتز الأبواب
5.5-6.1	500	VI و VII	تهدم محدود في المباني، تتشقق الدهانات ويسقط الطوب
6.2-6.9	100	VIII و IX	تهدم كثير من المباني وسقوط مآذن المساجد وأبراج الكنائس وتتحرك المنازل عن أساساتها
7.0-7.3	15	X	دمار شديد والتواء الكبارى وتشقق الحوائط وينهار كثير من المباني المبنية بالحجر والطوب.
7.4-7.9	4	XI	دمار عظيم وانهار معظم المباني
< 8.0	واحد كل 5 إلى عشر سنوات	XII	دمار شامل، وتصلل الموجات إلى سطح الأرض، وتطير الأشياء في الهواء.

نحدد أرقام ميركالي بناءً على قدر الدمار في المنشآت ودرجة الإحساس بتحريك الأرض، وهذه تعتمد على قدرة magnitude الزلزال وبعد الشخص عن مركز الزلزال وما إذا كان الشخص داخل المنشأ أو خارجه.

الهزة الأرضية: تعتبر الأعداد الكبيرة للقتلى والجرحى بسبب الهزات الأرضية من أكثر المخاطر الناشئة عن الزلازل. وتعرض المباني المقامة على صخور صلبة لدمار أقل من المباني المقامة على مواد ضعيفة غير متماسكة مثل الرواسب المشبعة بالماء أو مواد الردم الصناعية، حيث تكون مدة الهزة الأرضية المؤثرة على المواد الضعيفة والمشبعة بالماء أطول واتساع الموجة S أكبر من تلك المؤثرة على المباني المقامة على صخور الأساس. وتقبل مواد الرديم والرواسب المشبعة بالماء لأن تسيل، أى تسلك سلوك السائل، وهى العملية التى تعرف بالإسالة liquefaction. فعند حدوث هزة أرضية تفقد الحبيبات تماسكها وتنساب الأرض. ومن أمثلة الدمار الناتج عن الإسالة ما حدث في نيجاتا Niigata باليابان، حيث مالت المباني الكبيرة على جوانبها بعد انهيار التربة المشبعة بالماء المقامة عليها المباني على جوانب التلال. وقد سجلت ظاهرة الإسالة بمصر في عديد من القرى على الجانب الشرقى للتل (شكل 10.16) نتيجة الزلزال الذى تعرضت له مدينة القاهرة الكبرى بمصر يوم 12 أكتوبر 1992م. وبالإضافة إلى قدر الزلزال وجيولوجية المنطقة المقام عليها المباني، فإن المواد المستخدمة في إقامة المنشآت ونوعية البناء تؤثر أيضاً على حجم الدمار الحادث. فالمنشآت المقامة من الطين، تكون أضعف وتهاركلها تقريباً عند تعرضها للزلازل.

اندلاع النيران: يكون اندلاع النيران أحد المخاطر الرئيسية الناجمة عن الزلازل خاصة في مناطق الحضر. وقد تسببت النيران في حوالى 90٪ من الدمار الذى حدث عام 1906م أثناء زلزال سان فرانسيسكو. حيث تسببت الهزة الأرضية في تحطيم خطوط الغاز والكهرباء والتى لامست النيران، وبذلك بدأت الحرائق في أنحاء المدينة، واستمرت لحوالى ثلاثة أيام

وبينما تمثل زيادة قدر الزلزال وحدة واحدة على مقياس ريختر زيادة قدرها عشر مرات في اتساع درجة الزلازل، فإن زيادة وحدة واحدة في القدر تقابل تقريباً زيادة قدرها ثلاثين ضعفاً من الطاقة المنطلقة. فزلزال ألاسكا عام 1964م والذى بلغ قدره 8.6 أطلق حوالى تسعمائة ضعف الطاقة المنطلقة من زلزال نورث ريدج Northridge earthquake عام 1994م والذى بلغ قدره حوالى 6.7.

ومن المعلوم أن هناك أكثر من 900,000 زلزال تسجل حول العالم كل عام. ويمكن النظر إلى تلك الأعداد بطريقة أفضل، كما هو موضح في جدول (1.16)، والذى يبين أن الغالبية العظمى من هذه الزلازل يبلغ قدرها أقل من 3.4، وأن الزلازل العظمى، والتى يزيد قدرها عن 8 تقع كل خمسة إلى عشرة أعوام فقط في المتوسط. ويوضح الجدول مقارنة بين مقياس ميركالى وريختر.

ه. الدمار الناشئ عن الزلازل

يشمل الدمار الناشئ عن الزلازل جوانب عدة منها حدوث الهزات الأرضية والموجات الزلزالية البحرية والانزلاقات الأرضية، بالإضافة إلى اندلاع النيران واضطراب الخدمات المعيشية والذعر والصدمات النفسية. ويعتمد مقدار الدمار في الممتلكات وأعداد القتلى والجرحى على وقت حدوث الزلزال وقدره والمسافة من المركز السطحي للزلزال وجيولوجية المنطقة ونوع المباني المقامة وهيكلها البنائى والكثافة السكانية ومدة الهزة الأرضية. وعادة ما تكون الزلازل التى تحدث في وقت العمل وأثناء اليوم الدراسى في المناطق المزدحمة بالسكان أكثر دماراً.



شكل (10.16): ظاهرة الإسالة في قرية بدمسة على الجانب الشرقى لنهر النيل نتيجة زلزال 12 أكتوبر 1992 م.
(After Sabri, A. M. et al., 1993: Koam Al-Hawa earthquake, 12 October, 1992, Egypt: A damage in the Nile Valley, Ain Shams Sci. Bull., (Special Issue), 8-22).

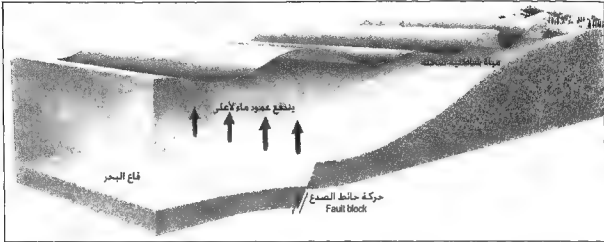
موجات في الماء تنتقل للخارج (شكل 11.16) مثل
الموجات التي تكون عندما يلقي بحجر في بركة ماء .

وتنتقل التسونامي بسرعات تتراوح بين 644 كم
و725 كم/ ساعة ، وتقل تدريجياً بمرور الوقت وزيادة
مسافة السفر ، ولكن تكون عموماً غير محسوسة في
المحيطات المفتوحة، حيث يكون ارتفاع موجات
التسونامي عادة أقل من متر ، والمسافة الأفقية بين قمم
الموجات تكون عدة كيلومترات . وعندما تقترب
التسونامي من الشواطئ تقل سرعة الموجات ويرتفع
الماء إلى ارتفاعات تصل إلى 30 متراً أو أكثر .

وقد ضرب التسونامي جزيرة هاواي عام 1964 م ،
وبعد 4.5 ساعة من حدوث زلزال بحري قوى
بالقرب من جزيرة يونيكاك Unimak في ألاسكا
تحركت الأمواج بسرعة وصلت إلى 800 كم/ ساعة ،
وعلى الرغم من أن اتساع الموجة في المحيط المفتوح كان

دمرت خلالها معظم المدينة . وفي عام 1989 م ، وخلال
زلزال لوما بريتا Loma Prieta earthquake في
سان فرانسيسكو ، حدث اندلاع محدود للنيران حيث
ساعدت الصمامات الموضوعة على خطوط الغاز والماء
في عزل الخطوط المحطمة .

التسونامي (الموجات البحرية الزلزالية): تنشأ
الموجات البحرية الزلزالية seismic sea waves
أو تسونامي tsunami (مشتقة من الكلمة اليابانية
tsu بمعنى مرفأ و nami بمعنى موجة) من الزلازل
التي تحدث على قيعان المحيطات ، قد تنشأ أيضاً
وبدرجة أقل من الانزلاقات الأرضية الكبيرة أو
النشاطات البركانية تحت سطح البحر . ومن الشائع
تسمية التسونامي باسم موجات المد والجزر tidal
waves على الرغم من عدم وجود أى علاقة لهذه
الموجات بالمد والجزر . وتنشأ معظم التسونامي نتيجة
حركة مفاجئة لقاع المحيط ، مما يتسبب في حدوث



شكل (11.16): تنشأ التسونامي من حركة الصدوع التي تسبب الزلازل على قاع البحر . حيث ينشأ عن حركة قاع البحر بسبب الزلازل موجة بحرية عاتية تؤدي إلى تذبذب وانسياب موجة بحرية طويلة يطلق عليها تسونامي . مثل هذه الموجة يكون ارتفاعها عدة أمتار فقط على قاع البحر العميق ولكن قد يزيد ارتفاعها عدة مرات عندما تصل إلى المياه الشاطئية الضحلة .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

دقيقة من الزلزال ، ووصلت أعلى موجة إلى ارتفاع 15 مترا ودمرت ثلاث قرى ساحلية تماما ، وقتلت أكثر من 2200 شخص . وقد حدث هذا العدد من القتلى بسبب عدم تحذير الأهالي ، بالإضافة إلى طبيعة الأرض المنخفضة في تلك القرى .

أما التسونامي الذي كان أقواها جميعا فهو ذلك التسونامي الذي حدث في 26 ديسمبر عام 2004م بالقرب من جزيرة سومطرة الأندونيسية ، والذي نشأ عن زلزال في قاع المحيط الهادي شمال أندونيسيا بقوة تزيد على 9.2 على مقياس ريختر ، وامتد تأثيره على سواحل المحيط الهندي من أندونيسيا وتايلاند شرقا حتى الصومال غربا ، ومرورا بكل شواطئ جنوب آسيا مثل الهند وسيلان (شكل 12.16) . وقد تسبب هذا التسونامي في موت ما يزيد على 300.000 نسمة ، كما ألحق دمارا شاملا في جزيرة آتشيه الأندونيسية وكثير من المناطق المطلة على المحيط الهندي .

أقل من متر واحد ، إلا أن هذا الاتساع زاد بالقرب من الشاطئ . وعندما ضربت الموجة شواطئ هاواي كان قد وصل ارتفاعها إلى 18 مترا . وقد تسبب هذا التسونامي في قتل 154 شخصا ودمر من الممتلكات ما يقدر بحوالي 25 مليون دولار . وقد أدى ذلك إلى إنشاء نظام للإنذار المبكر عن التسونامي في هونولولو هاواي في محاولة لتقليل الدمار الناتج عن التسونامي . ويشمل هذا النظام المبكر أجهزة سيزموغراف بالإضافة إلى أجهزة أخرى لكشف الموجات الناتجة عن الزلازل ، حتى يمكن الإبلاغ عن نشأة تسونامي وإعطاء التحذيرات في الوقت المناسب .

وقد حدثت أكبر الموجات البحرية الزلزالية (التسونامي) دمارا في القرن العشرين ، في يوليو عام 1998م في بابوا غينيا الاستوائية ، حيث حدث زلزال بقوة 7.1 على مقياس ريختر على بعد حوالي 20 كم من الشاطئ . ثم نشأت ثلاث موجات من المد بعد عشرين



شكل (12.16): الدمار الناشئ عن التسونامي (صورة من أحد المواقع على شبكة المعلومات الدولية - الإنترنت).

الأرضية ، وهل كان الزلزال نتيجة صدع عادي أم دسر أم انزلاق مضرى.

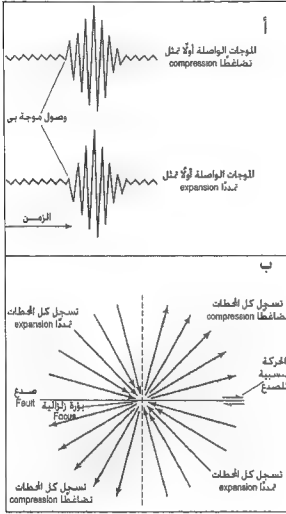
وإذا لم يُسجل أى أثر للتصدع في موقع الزلزال ، فإن ذلك يرجع إلى أن بؤرة الزلزال كانت بعيدة عن سطح الأرض . ومع ذلك ، فإنه يمكن لعلماء الزلازل تحديد نوعية التصدع الذى حدث تحت السطح من المعلومات المسجلة في السيزموجرام ، حيث إن عددا قليلا جداً من سطوح الصدوع تصل حتى سطح الأرض.

وقد تم حديثاً إنشاء عديد من أجهزة السيزموجراف حول العالم ، بحيث تسجل محطات الرصد أى بؤرة زلزال محتملة . فقد لاحظ علماء الزلازل أنه إذا كانت الحركة الزلزالية الأولى للأرض والمسجلة بسيزموجراف في اتجاه معين (موجه P) هى حركة دفع (push away) بعيداً عن بؤرة الزلزال وتوجه إلى السيزموجراف ، فهذا يعنى وصول قوة

الانهيارات الأرضية : إن الانهيارات الأرضية التى تحدث نتيجة الزلازل تكون خطيرة ، خاصة في المناطق الجبلية ، كما تكون مسئولة أيضاً عن الدمار الهائل والعدد الكبير من الوفيات . وقد أدى زلزال عام 1920م في جانسو Gansu بالصين إلى قتل ما يقرب من 100,000 نسمة بسبب انهيار الجروف المكونة من اللويس (غرين ترسب بالرياح) . كما تسبب زلزال بيرو عام 1970م في حدوث انهيارات أرضية دمرت مدينة Yungay town بنجى.

و. تحديد نوع التصدع من نتائج الزلزال

يقوم علماء الزلازل عند حدوث زلزال ما بتحليل السيزموجرام (شريط تسجيل الزلزال) في عدة محطات رصد ليحددوا المركز السطحي للزلزال وقدره ، ثم يقوموا بفحص التصدع الذى حدث عند هذا المركز . والهدف من هذا الفحص معرفة علاقة سطح الصدع واتجاه الانزلاق بالإجهاد أو الضغوط في القشرة



شكل (13.16): استخدام الحركة الأولى للموجات الزلزالية في تحديد اتجاه حركة الصدع
(أ) الحركة الأولى التي يسجلها السيزموجراف للموجة P ، والتي إما أن تكون متدفقة بعيداً عن بؤرة الزلزال (وصول تضامناً) أو متجهة إلى البؤرة (وصول تباعد).

(ب) تمثل الحركات الأولى المسجلة على عدد من محطات الرصد يساعد على تحديد اتجاه الحركة على سطح الصدع . ويوضح المثال المذكور حركة جانبية-يمينية على سطح صدع مضرى الانزلاق strike - slip fault.

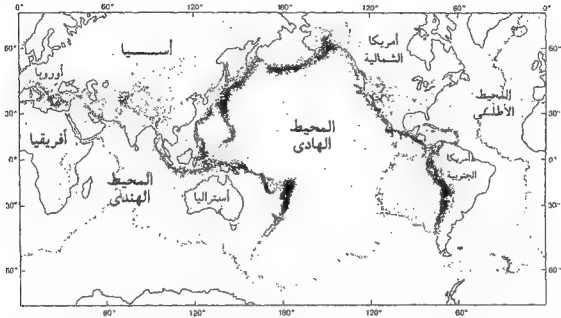
(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition, John Wiley and Sons, Inc., New York).

الزلازل (تقريباً 95٪) تقع في أحزمة زلزالية تقابل حدود الألواح ، حيث تنشأ الإجهادات (الضغط) نتيجة تقارب الألواح أو تباعدها أو انزلاقها بموازاة بعضها البعض . وتعرف الأحزمة الزلزالية seismic belts بأنها نطاقات زلزالية ضيقة ومستطيلة عادة ، وتتميز بتكرار تعرضها للهزات الأرضية الزلزالية . أما النشاط الزلزالي البعيد عن حدود الألواح فإنه يكون قليلاً جداً، ولكن قد يكون مدمراً عند حدوثه . والعلاقة واضحة بين حدود الألواح وتوزيع الزلازل ، حيث يلاحظ أن مواقع الزلازل تنطبق على حدود الألواح التكتونية (شكل 14.16).

ضغط، وأن الصخور قد تحركت ناحية السيزموجراف، ويكون اتجاه حركة الموجة لأعلى على السيزموجرام ، شكل (13.16 أ) . أما بالنسبة لأجهزة السيزموجراف الموجودة في الاتجاهات الأخرى فإن الحركة تكون حركة جذب pull toward في اتجاه بؤرة الزلزال ، مما يعنى وصول قوة شد ، ويكون اتجاه حركة الموجة لأسفل على السيزموجرام . ويوضح شكل (13.16 ب) تأثير زلزال نشأ نتيجة الحركة على صدع مضرى الانزلاق ، حيث يمكن تحديد حركة الصدع عند توقيع الحركات الأولى للزلازل من عدة سيزموجرافات .

II. توزيع الزلازل حول العالم

على الرغم من أنه لا يوجد أى جزء على سطح الأرض بعيداً عن حدوث زلازل ، إلا أن معظم



شكل (14.16): التوزيع الجغرافي للمراكز السطحية لثلاثين ألف زلزال حدث خلال الفترة 1961 - 1967م موضحة المناطق النشطة تكتونيا على سطح الأرض.

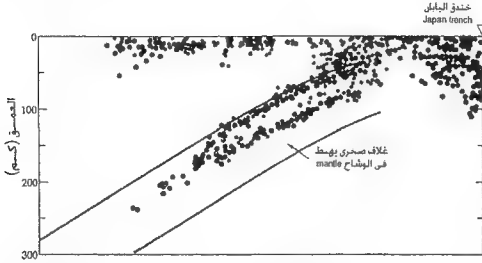
(After Barazangi, M. and Dorman, J., 1969: World seismicity maps compiled from ESSA coast and geodetic survey epicenter data, 1961-1967, Seismological Soc. Am. Bull. v. 59).

جبل طارق . ويعتبر زلزال عام 1993م في الهند والذي قتل حوالي ثلاثين ألف نسمة ، و زلزال عام 1995م المدمر في إيران والذي قتل حوالي أربعين ألف نسمة ، و زلزال عام 2003م في مدينة بام في جنوب شرق إيران والذي تسبب في قتل حوالي واحد وأربعين ألف نسمة، أمثلة للزلازل المدمرة في هذا النطاق . وتقع الخمسة في المائة الباقية من الزلازل في داخل الألواح وعلى امتداد حيود وسط المحيط . ومعظم هذه الزلازل لا تكون قوية ، على الرغم من أن بعض الزلازل الكبيرة داخل الألواح تكون جذيرة بالاهتمام .

والأحزمة الزلزالية هي أماكن لانطلاق كمية كبيرة من الطاقة الداخلية للأرض . ولذلك فإنه من المتوقع أن توجد مظاهر أخرى لانطلاق تلك الطاقة الداخلية تظهر في تلك الأحزمة . ومن هذه المظاهر حيود وسط المحيط mid-ocean ridges والخصائد المحيطية العميقة والبراكين الأنديزيتية ، وغيرها من المظاهر

وتقع معظم الزلازل (80٪ تقريبا) في الحزام الممتد على طول قاع المحيط الهادئ، ويعرف بالحزام حول الهادئ circum-Pacific belt وهو نطاق من النشاط الزلزالي يحيط بحوض المحيط الهادئ . ويمتد هذا الحزام بطول السلاسل الجبلية في غرب أمريكا من كيب هورن إلى ألاسكا ، ثم يعبر آسيا ليمتد جنوبا على امتداد شواطئ اليابان والفلبين وغينيا الجديدة وفيجي ، ثم يكمل الدائرة حيث يتجه جنوب إلى نيوزيلندا . وقد حدث في هذا النطاق أكثر الزلازل تدميرا في تاريخ الأرض ، والتي أدت لحدوث خسائر تقدر بـ 11 بلايين الدولارات ، وقتل أكثر من نصف مليون من البشر .

والحزام الزلزالي الكبير الثاني هو حزام البحر المتوسط - الهيمالايا Mediterranean- Himalayan belt ، حيث يقع حوله حوالي 15٪ من الزلازل . ويمتد هذا الحزام غربا من إندونيسيا إلى الهيمالايا ثم إيران فتركيا ثم منطقة البحر الأبيض المتوسط حتى



شكل (15.16): توزيع بؤر الزلازل في قطاع رأسى مأخوذ في نطاق الاندساس مزدوج تحت جزيرة هونشو في اليابان . تُحدد البؤر الزلزالية تحت عمق 100 كيلو متر مستويين متوازيين ، يقع أولهما على قمة اللوح المنكسر ، بينما يقع الآخر في الوسط . ويكون المستوى العلوى في حالة من التمدد، بينما يكون المستوى السفلى في حالة من التضغط . وتحدد الزلازل التي نشأت نتيجة هبوط جزء من الغلاف الصخري البارد نسبياً نطاق بيني أوف Benioff zone .

(After Hasegawa, In Lowrie, W., 1997: Fundamentals of Geophysics, Cambridge Univ. Press, Cambridge).

العالم الذى تعرّف على هذه الظاهرة لأول مرة (شكل 15.16). وتوضح هذه الملاحظة الهامة أن الزلازل العميقة ربما تنشأ في اللوح البارد نسبياً والمتحرك لأسفل عند نطاقات الاندساس subduction zone. ونظراً لأن بعض البؤر الزلزالية قد توجد عند أعماق تصل إلى 700 كم ، فلا بد من استنتاج أن الغلاف الصخري الهابط بسرعة ، يمكن أن يحتفظ على الأقل بقابلية التقصف عند هذا العمق . ومع ذلك ، فإنه من غير المعروف لماذا لم يتم تسجيل أى زلزال عند أعماق أكبر من 700 كم . بينما يرجع البعض ذلك إلى أن الغلاف الصخري الهابط بسرعة وعند وصوله لعمق 700 كم يصبح ساخناً بدرجة تكفى لأن تجعل الصخور لدنة أكثر منها قصفة . وتوضح مواقع الزلازل أشكال وتراكيب الألواح التكتونية . ولكى نتعرف طريقة تحرك الألواح واستجابتها للقوى المؤثرة عليها ، فإن ذلك يستلزم إجراء مزيد من الدراسات

الأخرى . وتحدد الأحزمة الزلزالية حدود الألواح أو تمتد موازية لها تقريبا ، قارن شكل (14.16) بشكل (11.1) .

كما يعكس عمق البؤر الزلزالية حول حدود الألواح معلومات إضافية أخرى . وتقع معظم البؤر الزلزالية على أعماق أقل من 100 كم ، حيث تشق الزلازل طريقها في الصخور القصفة وحول حدود الألواح ، وحيث يبلغ سمك الغلاف الصخري القصف 100 كم فقط . ومع ذلك فإنه قد ينشأ القليل من الزلازل عند أعماق كبيرة تصل إلى حوالى 700 كم . وجددير بالملاحظة أن تلك الزلازل العميقة لاتصاحب الحدود المحيطية أو الصدوع الناقلة ولكنها مرتبطة بالخنادق المحيطية . وتحدد تلك الخنادق الأماكن التى يغوص فيها الغلاف الصخري البارد القصف في الوشاح .

وقد أوضحت الدراسات التفصيلية للبؤر الزلزالية تحت الخنادق المحيطية ، أن هذه البؤر تتبع مسارا محددًا يسمى بنطاق بيني أوف Benioff zone على اسم

boundaries والتي تتطابق مع الحنادق المحيطية أو نطاقات التصادم القاري. وينشأ عند كل حد من هذه الحدود زلازل مميزة طبقاً لحركات الصدع وأعماق البؤر الزلزالية. ويوضح الشكلان (16.16 و 17.16) أنواع الحدود والزلازل المصاحبة لتلك الحدود.

أ. الأحزمة الزلزالية عند حدود الألواح

يوضح شكل (14.16) مواقع المراكز السطحية للزلازل والتي تقع في أحزمة. كما أمكن في السنوات الأخيرة تحديد الأحزمة الزلزالية بدقة بحيث يمكن مضاهاتها بالمظاهر الجيولوجية المختلفة.

1. الزلازل الضحلة البؤرة عند الحدود المتباعدة

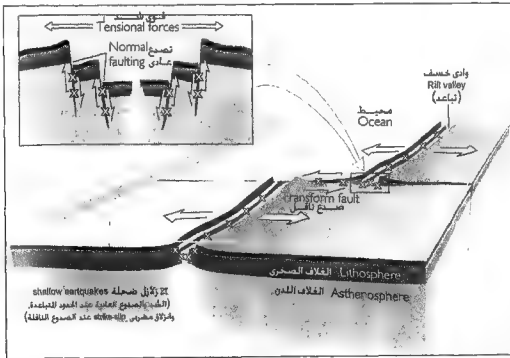
تقع كل حدود الألواح المتباعدة تقريباً على قيعان المحيطات. وتتطابق الأحزمة الضيقة لزلازل وسط المحيط مع قمم حيد وسط المحيط (شكل 16.16). وعند فحص طوبوغرافية حيد وسط المحيط تفصيلياً،

الزلزالية التفصيلية، خاصة دراسة الحركة الزلزالية الأولى.

III. الزلازل وتكتونية الألواح

تقدم نتائج تحديد مواقع الزلازل والحركات الأولى للزلازل أهم الأدلة على صحة نظرية تكتونية الألواح. ويوضح (شكل 14.16) حدود الألواح التي تحددها أحزمة زلزالية ضيقة، كما أمكن تحديد حركاتها بواسطة دراسات الحركة الأولى للزلازل.

وكما أوضحنا في الفصل الأول فإنه يمكن تمييز ثلاثة أنواع من حدود الألواح: (1) حدود متباعدة divergent boundaries أو مراكز انتشار spreading centers والتي تتطابق مع وديان الخسف فوق القارات وحيد وسط المحيط، (2) حدود الصدع الناقل transform fault boundaries، (3) حدود متقاربة convergent



شكل (16.16): الزلازل المصاحبة لأنواع من حدود الألواح: الحدود المتباعدة عند حيد وسط المحيط mid-ocean ridges، وحدود الصدع الناقلة transform faults.

After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York.

3. الزلازل العميقة البؤرة عند الحدود المتقاربة

لقد أظهرت الدراسات أن الزلازل التي تنشأ عند أعماق تزيد على 100 كم تتطابق مع نوعين من المواضع أو لمعها: حدود الاندساس subduction boundaries ، حيث يحدث اندساس subduction لغلاف صخرى يعلوه قشرة محيطية في الوشاح (الأسثينوسفير أو الميزوسفير). وتمثل الحافة الغربية لقارة أمريكا الجنوبية وسلاسل الجزر التي تكوّن اليابان والفلبين مثل تلك المناطق. ثانيها: حدود التصادم collision boundaries حيث تتصادم قارتان. ويتميز كل نوع من تلك الحدود المتقاربة بنمط معين من النشاط الزلزالي.

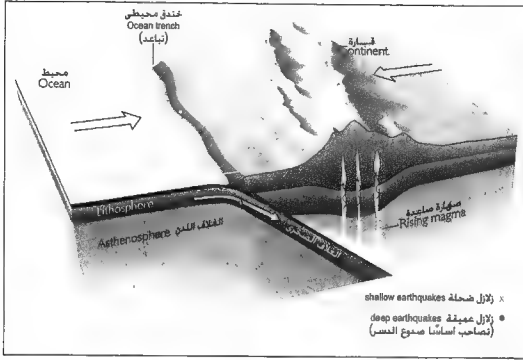
فعندما يندس غلاف صخرى محيطي ، فإنه يتعرض لإجهادات (ضغوط) stresses معقدة ، وتحدث عدة أنواع من الزلازل (شكل 16، 17). ويتسبب انحناء الغلاف الصخري لأسفل أثناء عملية الاندساس في حدوث صدوع عادية في الجزء العلوي من اللوح ، وتكون كل الزلازل المصاحبة لتلك الصدوع ضحلة البؤرة جدا وذات قيم قليلة على مقياس ريختر. وتتضمن عملية الاندساس انزلاق لوح تحت آخر. ولذلك فإن الحد الفاصل بين هذين اللوحين يكون عبارة عن صدع دسر thrust fault ، وتكون الزلازل المتكونة عند عمق أقل من 100 كم (المنطقة التي يتلامس فيها لوح الغلاف الصخري) ذات قيم كبيرة على مقياس ريختر. وعندما يزيد العمق عن 100 كم ، ويغوص الغلاف الصخري المندس في الأسثينوسفير ، فإن الزلازل تحدث في اللوح المندس. وتدل بعض الزلازل على حدوث إجهاد شد (صدوع عادية)، بينما تدل الزلازل الأخرى على حدوث إجهاد ضغط (صدوع معكوسة). وتدل الزلازل العميقة الناشئة عن

وجد أن الحيوذ تكون غالبا مقسمة إلى أجزاء ، حيث تفصل الصدوع الناقلة بين تلك الأجزاء. وتقع المراكز السطحية للزلازل أيضاً على امتداد الصدوع الناقلة بين أجزاء الحيوذ المزاخة. كما أوضحت دراسة ميكانيكية الصدوع عند قمة الحيوذ المحيطية من تحليل الحركة الزلزالية الأولى لموجة P ، أن تلك الصدوع من النوع العادي وأن مضربها يمتد موازيا لاتجاه الحيوذ المحيطية. وتدل الصدوع العادية normal faults أن قوى الشد كانت هي القوى السائدة ، ويفسر ذلك وجود وديان خسف تمتد عند قمم الحيوذ. وقد وجد علماء الزلازل أن حيوذ وسط المحيط تحدد حدود الألواح ، حيث تتباعد الألواح عن بعضها البعض. كما وجدوا أيضا أن الزلازل التي تتطابق مع الصدوع الناقلة توضح ميكانيكية الانزلاق المضربي. ويقدم علم الزلازل الدليل على أن الألواح كانت تتباعد عن بعضها عند قمم حيوذ وسط المحيط.

2. الزلازل الضحلة البؤرة عند حدود الصدوع الناقلة

كما أوضحنا في الفصل الأول ، فإن الصدوع الناقلة هي صدوع رأسية مضربية الانزلاق strike-slip faults تقطع الغلاف الصخري ، وهي الحدود التي يتزلق عندها لوحان بمحاذاة بعضهما البعض.

وتدل دراسة الحركة الأولى للزلازل أن الحركة التي تحدث على امتداد حدود الصدوع الناقلة هي حركة موازية لاتجاه المضرب ، وأن الزلازل ضحلة البؤرة لا يزيد عمقها على 100 كم ، وتتميز بقيم عالية على مقياس ريختر. وتدل دراسة مواضع البؤر الزلزالية أنه عندما يقطع صدع ناقل قشرة قارية فإنه يتكون في الغالب من سلسلة من الصدوع المتوازية ، بدلا من صدع واحد. ويبدو أن هذا هو الحال عند دراسة صدع سان أندرياس بأمريكا.



شكل (17.16): الزلازل الضحلة والعميقة المصاحبة لحدود الألواح المتقاربة ، حيث تنشأ الزلازل نتيجة قوى الضغط . وقد أدى اصطاف البؤر الزلزالية في مستوى مائل إلى اكتشاف الألواح المتدسة .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

4. الزلازل الضحلة البؤرة داخل الألواح

على الرغم من أن معظم الزلازل توجد عند حدود الألواح ، إلا أن الخريطة الزلزالية للعالم توضح وجود نسبة بسيطة من الزلازل داخل الألواح . وتتميز البؤر الزلزالية لتلك الزلازل بأنها ضحلة نسبياً ، وأن معظمها يوجد فوق القارات . ومن بين تلك الزلازل ، بعض الزلازل الأكثر تدميراً في التاريخ الأمريكي ، مثل نيومديد - ميزوري عام 1812م وشارليستون في جنوب كارولينا عام 1886م وبوستون في ماساشوسيتس عام 1755م . ويبدو أن هناك قوى كبيرة داخل القشرة الأرضية لا تزال تعمل وتسبب التصدع داخل ألواح الغلاف الصخري ، بعيداً عن الحدود الحديثة للألواح .

قوى شد في الألواح المتدسة ، على أن الغلاف الصخري يغوص تحت تأثير وزنه .

وقد وجد أن الزلازل التي تنشأ عند حدود التصادم ، وهي تمثل حدوداً متقاربة أيضاً ، تتميز بنشاط زلزالي معين . وحدود التصادم collision boundaries هي الأماكن التي تصادم فيها قارتان . وتمثل سلسلة جبال الهيمالايا بين الهند وآسيا ، حد تصادم لم يصل لمرحلة الثبات بعد . ويميل نطاق التصادم لأن يكون منطقة يبلغ عرضها عدة كيلومترات تعرضت الصخور فيها لتضاغط شديد ، وتوجد فيها صدوع دسر . ويزداد سمك الغلاف الصخري عند نطاق التصادم . وقد توجد بؤر الزلازل على أعماق تصل إلى 300 كم وتكون ذات قيم أكبر على مقياس ريختر . وتدل الحركات الأولى للزلازل على نشأة تلك الزلازل نتيجة الحركة على صدوع دسر .

IV. توقع الزلازل

ويقدم الجزء من صدم سان أندرياس الذي يقطع جنوب كاليفورنيا مثالاً واضحاً على تطبيق هذه الطريقة. ويقدر زمن التكرار recurrence time بين زلزالين قوين في هذه المنطقة والمقدر بعدة طرق ، من 100 إلى 150 سنة . ونظراً لأن آخر زلزال قوى قد حدث في تلك المنطقة في عام 1857 م ، فإنه من المتوقع حدوث زلزال قوى جديد فيها في أى وقت من الآن حتى عدة عقود تالية .

ب. توقع الزلازل على أساس فيزيائي

وينشغل علماء الولايات المتحدة واليابان والصين وروسيا والعديد من الدول الأخرى حالياً في بحث مكثف عن المؤشرات التي يمكن أن تستخدم في توقع وقت ومكان الزلازل المدمرة على أساس التغيرات الفيزيائية في القشرة الأرضية . وقد توصلوا إلى بعض المؤشرات التي يمكن أن تستخدم في هذا الإطار وهي :

- الميل السريع للأرض ، أو تشوه سطح الأرض بأى شكل من الأشكال.
- انزلاق لزلزالى aseismic غير عادى، يحدث ببطء على امتداد صدم بدلاً من الانزلاق المفاجئ الذى يصاحبه زلزال في المنطقة قبل الهزة الرئيسية.
- استطالة القشرة الأرضية في فترة معينة ، وقد يسبب هذا الانفعال الناشئ عن الشد في جذب الكتلتين على جانبي الصدم ، مما يقلل من الاحتكاك من الكتلتين على جانبي الصدم ، ويسبب بالتالى عدم قفل الصدم unlocking .
- التغير في مستوى سطح الماء في الآبار . وقد تسبق تلك التغيرات الزلزال بسبب زيادة أو نقص مسامية الصخور كنتيجة للتغيرات الأولية في الإجهاد .
- التغير في الخواص الفيزيائية للصخور بالقرب من صدم ما ، مثل قابليته لتوصيل تيار كهربى.

تعتبر الزلازل أهم أسباب الكوارث الطبيعية المروعة . ولذلك ، فإنه من الطبيعى أن تدور نسبة كبيرة من الأبحاث حول الزلازل ، حيث يحدو العلماء الأمل في التوصل إلى طريقة لتحسين قدرتنا على توقع الزلازل من خلال تلك الأبحاث . ويعتمد توقع الزلازل على : (1) أساس إحصائي ، مثل الفجوة الزلزالية وزمن التكرار ، (2) أساس فيزيائي مثل التغيرات في القشرة الأرضية وخصائصها الفيزيائية ، (3) أساس بيوفيزيائي مثل سلوك الحيوانات .

ونعرض فيما يلي وصفا لكل من هذه الطرق الثلاث.

أ. توقع الزلازل على أساس إحصائي

إذا طلب من أحد علماء الزلازل أن يتوقع موعد حدوث زلزال كبير فإن إجابته ستكون "كلما طال الزمن منذ آخر زلزال كبير كلما اقترب موعد الزلزال الكبير التالي". ومثل هذه المقولة الأساس الذى تقوم عليه طريقة الفجوة الزلزالية seismic gap method . والفكرة الرئيسية لهذه الطريقة ، أن الزلازل تتيج نتيجة تراكم الإجهادات الناشئة عن الحركة المطردة للألواح على امتداد الصدوع ، وعند الوصول إلى مستوى خرج من الإجهاد ، فإن الغلاف الصخري يتكسر . وتكرر هذه الدورة التى تنشأ من التراكم البطيء للإجهاد والانطلاق المفاجئ للطاقة في هيئة زلزال مرار ومرات . ويختلف متوسط الفترة الزمنية الفاصلة بين زلزالين قوين من مكان لآخر . وطبقاً لطريقة الفجوة الزلزالية ، فإن المناطق ذات الاحتمالات العالية لحدوث زلازل قوية في نطاق صدم نشط ، هي المسافة أو الجزء المخلق من صدم لم يحدث به زلزال رئيسي لفترة زمنية تساوى أو تزيد عن متوسط الفترة الزمنية بين زلزالين قوين في هذا الموقع ، بينما قد تحدث مثل هذه الزلازل في بقية النطاق.

• الزيادة غير العادية في تكرار حدوث زلازل صغيرة قبل هزة رئيسية .

وفي الحقيقة ، فقد تم تتبع كل تلك الظواهر ، حيث إن ظاهرتين أو أكثر منها قد تجتمعان ، إلا أنه ليس بالطريقة التي يمكن اعتبارها طريقة ثابتة ويعمل عليها في التوقع .

جد. توقع الزلازل على أساس بيوفيزيائي

نظراً لمعاناة الصين من عديد من الزلازل الرهيبة ، فقد حاول العلماء الصينيون التوصل إلى طريقة توقع الزلازل وذلك من خلال ملاحظة سلوك الحيوانات عند حدوث الزلازل . ففى يوم 18 يوليو 1969 م لاحظ حراس حديقة حيوانات تيانجين Tianjin أن حيوانات الباندا (حيوانات تشبه الدب) الهادئة أخذت في الصراخ ، كما رفض البجع الاقتراب من الماء ، ولم تختبئ الثعابين في جحورها تحت الأرض . كما تضمن تقرير حراس الحيوانات أيضاً المزيد من الملاحظات التي يمكن أن تستخدم في توقع الزلازل . وقد حدث زلزال قدره 7.4 على مقياس ريختر في اليوم نفسه .

برامج الحماية الزلزالية: تعطى خريطة المخاطر الزلزالية seismic-risk map الأساس لتنظيم البرامج المحلية للحماية من الزلازل طبقاً لدرجة الخطر . ففى مناطق المخاطر العالية ، فإن مدونة (كود) المباني تتطلب تصميمات هندسية تتحمل الآثار التدميرية للزلازل . ويجب عند البناء في مناطق خطيرة مراعاة تثبيت الأساس جيداً ، وتثبيت خطوط الغاز بالأرض جيداً ، كما يجب أن تكون الخطوط مرنة لتجنب حدوث أى تسرب للغاز ، والذي يكون مصدراً للحرائق في هذه الحالة . كما يجب تثبيت الأرفق بالحواط ، ووضع الأشياء الثقيلة في الأجزاء السفلى منها ، وكذلك تجنب وضع أسرة النوم بالقرب من النوافذ .

٧. استكشاف باطن الأرض باستخدام الموجات الزلزالية

يعرف الجيولوجيون أن الأنواع المختلفة من الموجات الزلزالية تتميز بصفات عامة مشتركة هي:

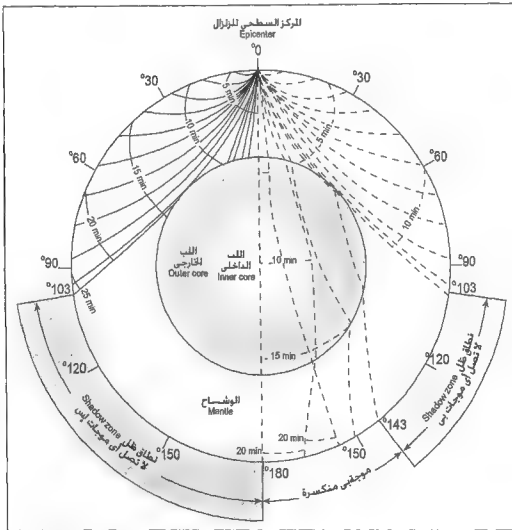
1. تعتمد السرعة التي تنتقل بها الموجات على كثافة ومرونة elasticity المادة التي تمر خلالها. فتنقل الموجات الزلزالية بسرعة أكبر في المواد الصلبة التي تعود فيه المادة إلى شكلها الأصلي بمرونة عند زوال الإجهاد المؤثر . فقد تنتقل الموجات الزلزالية بسرعة أكبر خلال الصخور المتبلورة مثل الجرانيت عنها خلال طبقة من مادة غير متماسكة مثل الرمل .
2. تزيد سرعة الموجات الزلزالية عموماً في الطبقة نفسها كلما زاد العمق ، حيث تسبب زيادة الضغط كبس الصخر ليصبح أكثر تماسكاً ومرونة .
3. الموجات الأولية (موجات P) هي موجات تضاغية تتأرجح إلى الأمام والخلف في اتجاه نفسه الذي تنتقل فيه ، بينما الموجات الثانوية (موجات S) هي موجات قص shear waves ، أى موجات مستعرضة تسبب اهتزاز المواد التي تمر خلالها في اتجاه عمودى على اتجاه انتشارها . وتنتقل الموجات الأولية بسرعة أكبر من الموجات الثانوية عبر الأرض .
4. عندما تنتقل الموجات الزلزالية من مادة إلى أخرى ، فإن بعض الموجات ترتد عند الحد الفاصل بين المادتين ، بمعنى أنها تنعكس ، بينما ينفذ بعضها إلى المادة الأخرى، مثلما ينعكس الضوء جزئياً عند زجاج نافذة ، بينما يمر بعضه الآخر . وتنعنى الموجات التي تنفذ خلال الحد الفاصل بين الوسيطين أى تنكسر ، حيث إن سرعة الموجات في المادة الثانية تختلف عن سرعتها في المادة الأولى .

أ. انتقال الموجات الزلزالية في الأرض

الأرض تتكون من طبقات ، تتكون من مواد مختلفة تنتقل عبرها الموجات بسرعات مختلفة ، وتنحني الموجات عندما تنتقل من طبقة لأخرى ، ولذلك يكون مسار الموجات في باطن الأرض منحنيًا.

وتقدم نتائج دراسة الموجات الزلزالية أحد أهم الأدلة على وجود لب الأرض . فالموجات الزلزالية لا تصل إلى مناطق معينة من الأرض على الجانب المقابل لزلزال كبير . ويوضح (شكل 18.16) أن

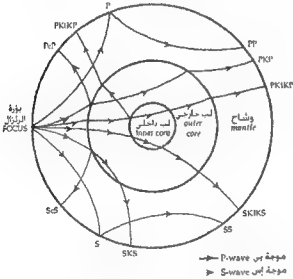
إذا افترضنا جندلا أن الأرض تتكون من مادة واحدة متجانسة ذات خصائص ثابتة من سطح الأرض وحتى مركز الأرض ، فإن الموجات الأولية والثانوية سوف تنتقل في خط مستقيم من بؤرة الزلزال وعبر الأرض حتى جهاز السيزموجراف البعيد . ولكن ، لا تتبع الموجات المسار المستقيم عند انتقالها عبر الأرض . مما دعا الجيولوجيين إلى أن يستنتجوا أن



شكل (18.16): مسارات الموجات P من مركز الزلزال والتي يكون لها مركز سطحي epicenter عند 0° وهي مبنية بخطوط متقطعة في الجزء الأيمن من القطاع فقط ، أما مسارات الموجات S فتكون مبنية بخطوط متصلة في النصف الأيسر من الشكل . ويخلق انعكاس وانكسار الموجات P على الحد الفاصل بين الوشاح واللب نطاق ظل shadow zone لموجات P من 103° إلى 143° . وحيث إن موجات S لا تستطيع المرور عبر السوائل ، فإنه يوجد نطاق ظل لموجات S بين 103° و 180° .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

آخر مستمد من سلوك الموجات الثانوية (موجات S) في التوصل للاستنتاج السابق (شكل 18.16). فعندما تنفذ الأشعة الثانوية في اللب، فإنها تنفصل في أن تصل إلى الجانب الآخر للأرض. ويتكون أيضاً نطاق ظل بالنسبة لموجات S، إلا أنه أكبر من نطاق ظل موجات P، فموجات S لا تسجل خلال كل المنطقة بعد 103° من بؤرة الزلزال. ويشير وجود نطاق ظل موجات S إلى أن هذه الموجات لا تنتقل خلال اللب على الإطلاق. ومن المعروف أن الموجات الثانوية لا تنتقل خلال السوائل، ولذلك استنتج الجيولوجيون أن لب الأرض في حالة منصهرة وقد حجب الموجات الثانوية من الانتقال في تلك المسافات.



شكل (19.16): مسارات الموجات الزلزالية لبعض حالات موجات P وموجات S المنعكسة والمكسرة المهمة من زلزال بؤرته على سطح الأرض.

(After Lowrie, W., 1997: Fundamentals of Geophysics, Cambridge Univ. Press, Cambridge).

وحيث إن وجود موجة منعكسة يتطلب وجود حد يفصل بين مادتين، لذلك فإن وجود انعكاسات reflections للموجات داخل الأرض يعني وجود حدود في باطن الأرض. ولترى ماذا يحدث عندما ترتد موجات P وموجات S عند الحد الفاصل بين طبقتين. ويوضح شكل (19.16) أنه يمكن استخدام الموجة

موجات P تنتشر من زلزال ما وتصل إلى سطح الأرض حتى 103° من بؤرة الزلزال، ثم تخفى تلك الموجات فجأة من السيزموجرام.

وعند تتبع مسار الموجة التي تكاد تلمس لب الأرض، فإنها تصل إلى سطح الأرض عند زاوية مقدارها 103°، ثم إذا تتبعنا الموجات التي تخترق لب الأرض، فإننا نلاحظ أنها تنحني لأسفل عند دخولها اللب ثم تنحني ثانية عند مغادرة لب الأرض. وبسبب هذا الانحناء عند الحد الفاصل بين لب الأرض والوشاح، فإنه لا يبرز أى من هذه الموجات عند سطح الأرض قبل مسافة زاوية مقدارها 143° من بؤرة الزلزال. ولذلك، لا تصل أى موجات أولية (موجات P) إلى سطح الأرض بين 103° و 143° حيث يشكل لب الأرض ظلاً على امتداد ذلك النطاق، والذي يسمى نطاق الظل shadow zone. ويشبه ذلك، ما يحدث عندما يحجب جسم معتم أشعة الضوء، ويتكون ظل خلف هذا الجسم. وبعد أكثر من 143° من بؤرة الزلزال، تعاود موجات P الظهور مرة ثانية على السيزموجرام.

وقد أدى اكتشاف نطاق الظل أن يستنتج الجيولوجيون أن للأرض لباً مكوناً من مادة مختلفة عن الوشاح الذي يعلوه. كما استنتجوا أن هذا اللب في حالة سائلة، لأن الأمواج تنحني لأسفل بدلاً من انكسارها لأعلى حينها تنفذ في اللب، مثل انكسار شعاع الضوء لأسفل عند انتقاله من الهواء إلى الماء. ويعني ذلك أن الموجات تنتقل في اللب بسرعة أقل من انتقالها في الوشاح. لأنه من المعروف أن الموجات الأولية (موجات P) تنتقل بسرعة أقل بكثير في السوائل عنها في المواد الصلبة. ولذلك فإنه من المنطقي أن نستنتج أن وجود نطاق الظل يستوجب أن الجزء الخارجى من اللب في حالة منصهرة. وقد ساهم دليل

نشأة الأرض عندما كانت الأرض منصهرة تماماً ، حيث هبطت المواد الثقيلة ذات الكثافة العالية بينما طفت المواد الأخف ذات الكثافة الأقل إلى أعلى . أما التطبيق التركيبى structural layering فهو يمثل مادة لها المكونات نفسها ولكنها تعرضت إلى تغيير في أطوارها . ويحدث التغير في الطور عندما ينصهر الصخر كلية أو يقارب ذلك ، أو عندما تعيد الذرات ترتيب نفسها في المعادن في بنيات بلورية أكثر إحكاما نتيجة للضغط الهائل التي توجد عند الأعماق الكبيرة .

وبناءً على نتائج دراسة الزلازل التي جمعت من محطات الرصد المنتشرة على مستوى العالم ، فقد تم عمل دراسة تفصيلية عن باطن الأرض . وتوضح تلك الدراسة أن الأرض تنقسم إلى أربع طبقات رئيسية هي: (1) القشرة crust وهى طبقة خارجية رقيقة جداً، (2) الوشاح mantle وهو طبقة صخرية تقع تحت القشرة ويبلغ سمكها الأقصى 2885 كم ، (3) اللب الخارجى outer core وهو طبقة يبلغ سمكها حوالى 2270 كم وله خصائص سائل متحرك ، (4) لب داخلى inner core وهو عبارة عن جسم كروى فلزى صلب يبلغ نصف قطره 1216 كم . وتتميز كل طبقة من تلك الطبقات بمجموعة من الخصائص نعرضها فيما يلى ، بالإضافة إلى بعض الملامح الخاصة لتلك الطبقات .

1. القشرة

توصل العالم البوغوسلافى موهوروفيتش Mohorovicic إلى الدليل على وجود حد فاصل بين القشرة الأرضية والوشاح ، حيث لاحظ أن أجهزة السيزموجراف الموجودة على بعد حوالى 800 كم من بؤرة الزلازل السطحية ، والتي تقع بؤرتها على بعد حوالى 40 كم من سطح الأرض ، قد سجلت

PcP أثناء ارتدادها من لب الأرض إلى سطحها في تحديد عمق لب الأرض ، لأن سرعة الموجات الأولية معروفة ، وبالتالي يمكن حساب الزمن الذى تستغرقه رحلة الموجة PcP ، كما يحدث بالضغط عند استخدام الزمن الذى يستغرقه الصدى echo لنسمعه مرة أخرى في قياس المسافة من جانب الوادى إلى الجانب الآخر . كما يمكن أن ترند الموجات الأولية من سطح الأرض إلى داخل الأرض كما توضحه الموجة PP في شكل (19.16) . كما يوضح الشكل الموجات الثانوية المرتدة مرة أخرى داخل الأرض (موجة SS في شكل 19.16) . والموجات الأولية التى تخترق اللب الخارجى (PKP) أو اللب الداخلى (PKIKP) هى موجات مهمة لاكتشاف تلك المناطق . ومن أهم التطبيقات العملية لانعكاس الموجات الزلزالية الاصطناعية استخدامها في استكشاف البترول ، وكذلك قياس سمك المثالج ، أو استخدام الموجات الأولية (موجات P) من مصدر صناعى لتحديد عمق المحيط .

ب. اكتشاف التركيب الداخلى للأرض

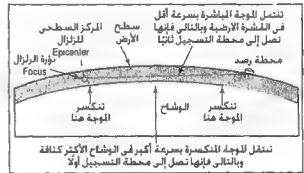
أدى ظهور أجهزة تسجيل الزلازل الحساسة والساعات العالية الدقة إلى دراسة الموجات الزلزالية بدقة . وقد أصبح من الممكن اكتشاف وجود تغير مفاجئ في سرعة الموجات عند أعماق معينة ، بالإضافة إلى التغير التدريجى في سرعتها وانعكاساتها كما سبق أن ذكرنا . وحيث إنه قد تم رصد تلك التغيرات الفجائية (الانقطاعات) على مستوى العالم ، فقد توصل علماء الزلازل إلى أن الأرض يجب أن تكون مكونة من طبقات مميزة أو أغلفة shells مختلفة في مكوناتها المعدنية أو في بنيتها البلورية . ويبدو أن وجود طبقات مختلفة المكونات (المحتوى) يرجع إلى عملية التمايز differentiation التى حدثت في المراحل الأولى من

الصخرية المحتملة للقشرة الأرضية . ويصل سمك القشرة تحت قيعان المحيطات إلى أقل من 10 كم ، حيث تدل خصائص المرونة للقشرة المحيطية أنها مكونة من صخور البازلت والجابرو . ويختلف سمك القشرة القارية ومكوناتها الصخرية عن القشرة المحيطية ، حيث يتراوح سمك القشرة القارية من 20 إلى 60 كم ، وتميل لأن تصبح أكثر سمكا تحت كتل الجبال الأساسية . وتدل خصائص المرونة لصخور القشرة الأرضية أنها مكونة أساسا من صخور الجرانيت والديوريت ، على الرغم من أنها تتكون من صخور تشبه صخور القشرة المحيطية في بعض المناطق الواقعة فوق انقطاع موهو مباشرة . وتتوافق تلك النتائج مع المعلومات التي تم الحصول عليها عن القشرة الأرضية من الدلائل الأخرى مثل التخریط الجيولوجي والحفر العميق في القشرة الأرضية . وقد أعطى هذا التوافق في النتائج الثقة للجيولوجيين لاستنتاج تركيب الوشاح والمكونات المعدنية له ، حيث يندر وجود دلائل أخرى لتقدير تركيب ومكونات هذا الوشاح .

2. الوشاح

يعتبر الوشاح لغزا كبيرا ، على الرغم من ضخامته ونحملكه فيما يحدث في القشرة الأرضية ، حيث لا يمكن رؤيته . وتتراوح سرعة الموجات الأولية (موجات P) في القشرة بين 6 إلى 7 كم/ ثانية ، بينما تكون تلك السرعات تحت خط موهو أكبر من 8 كم/ ثانية (شكل 21.16) . وتظهر التجارب العملية أن سرعة الموجات الأولية في الصخور الشائعة في القشرة الأرضية مثل الجرانيت والجابرو والبازلت تتراوح بين

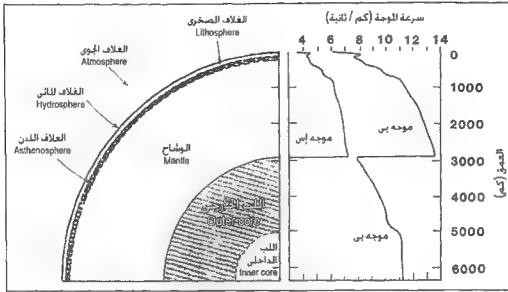
مجموعتين متميزتين من موجات P وموجات S . واستنتج موهوروفيتش أن المجموعة الأولى من موجات P و S قد انتقلت من البؤرة إلى محطة الرصد عبر مسار مباشر خلال القشرة الأرضية ، بينما المجموعة الثانية من موجات P و S والتي وصلت بسرعة أكبر نسبيا ، فهي الموجات التي انكسرت عند عمق معين في باطن الأرض ، ثم نفذت في نطاق سرعة أعلى يقع أسفل القشرة ، ثم انتقلت خلال هذا النطاق لتنعكس مرة أخرى لأعلى إلى سطح الأرض (شكل 20.16) . وقد افترض موهوروفيتش أن هناك حداً مميزا يفصل القشرة عن نطاق يوجد أسفلها يختلف في المكونات الصخرية . ويشير العلماء الآن إلى هذا الحد باسم انقطاع موهوروفيتش Mohorovicic discontinuity ويعرف بأنه حد انقطاع زلزالي يحدد قاعدة القشرة الأرضية . ويسمى هذا الحد عادة بانقطاع - إم M-discontinuity ، ويعرف اختصارا بموهو Moho .



شكل (20.16): مسارات انتقال موجات زلزالية مباشرة وأخرى منكسرة من بؤرة زلزال ضحل إلى محطة رصد قريبة .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وقد استخدمت سرعات الموجات الزلزالية في العمل لتحديد عمق انقطاع موهو ولتقدير المكونات



شكل (21.16): يساعد اختلاف سرعة موجات P و S في تعرف التركيب الداخلي للأرض .
(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

3. اللب

6 و 7 كم/ثانية ، بينما تزيد تلك السرعات عن 8 كم/ثانية في الصخور الغنية بالمعادن العالية الكثافة مثل الأوليفين والبيروكسين. ولذلك فإننا نستنتج أن صخورا مثل صخر الريدويت الغني في تلك المعادن يجب أن يكون ضمن المواد الأساسية المكونة للوشاح . ويتفق هذا الاستنتاج مع بعض الأدلة القليلة غير المباشرة والمتاحة والمتعلقة بالمكونات الصخرية للجزء العلوي من الوشاح . فقد نستطيع الحصول على بعض الأدلة من العينات النادرة من صخور الوشاح الموجودة في أنابيب الكمبرليت kimberlite pipes ، وهي كتل صخرية ضيقة تشبه الأنابيب مكونة من صخور نارية متداخلة تحتوى أحيانا على بلورات من الماس ، وهي توجد متداخلة في قشور القشرة الأرضية إلا أنها تنشأ في أعماق الوشاح .

تأثر كل من الموجات الأولية والثانوية بشدة بالحد الموجود عند عمق حوالي 2900 كم (شكل 21.16). فعندما تصل الموجات P إلى هذا الحد ، فإنها تنعكس وتنعكس بقوة بحيث يشكل هذا الحد ظلًا للموجات الأولية ، وهي مساحة على سطح الأرض تقابل البؤرة السطحية ، حيث لا يلاحظ وجود أى موجات أولية (موجات P) . وقد استنتج الجيولوجيون أن الحد الموجود على عمق 2900 كم هو الحد الفاصل بين الوشاح واللب ، حيث أن هذا الحد يمكن تمييزه بوضوح . ويشكل هذا الحد نفسه ظلًا للموجات الثانوية أكثر وضوحا . ولا يرجع السبب هنا إلى الانعكاس أو الانكسار ، بل إلى حقيقة أن الموجات الثانوية لا تنفذ في السوائل . ومن دراستنا لسلوك الموجات الثانوية ومن نطاق الظل الضخم لموجات S ، يمكن أن نستنتج أن اللب الخارجي يكون سائلا .

الوشاح (عند عمق 2900 كم) وإلى عمق 5350 كم بحيث يكون اللب في الحالة السائلة. ولكن يوجد حد انكسار وانعكاس واضح عند عمق 5350 كم، وربما يمثل هذا الحد الانتقال من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة. ومن الواضح أن الضغط يرتفع من عمق 5350 كم وحتى مركز الأرض، بحيث يستطيع التغلب على تأثير الحرارة، ويكون الحديد في حالة صلبة ليكون لب الأرض الصلب.

جـ. الطبقات المختلفة الخصائص الفيزيائية في الوشاح
لقد أوضحت الدراسات المختلفة أنه لا توجد اختلافات في المكونات الصخرية للوشاح. وعلى الرغم من أن سرعة الموجات الزلزالية تزداد عموماً في الوشاح مع العمق، إلا أن هناك عدة انقطاعات (تغيرات في سرعة الموجات)، والتي يبدو أنها نتيجة تغيرات في الخصائص الفيزيائية للوشاح. فبين عمق 100 كم وهو الحد السفلي للقشرة الأرضية، وعمق 350 كم تنخفض سرعة كل من الموجات الأولية والثانوية بوضوح، وتعرف هذه الطبقة بين عمق 100 كم و 350 كم بنطاق السرعة المنخفضة **low-velocity zone**، ويظهر هذا النطاق تحت قيعان المحيطات بشكل أكثر وضوحاً عنه تحت القارات. ويقابل نطاق السرعة المنخفضة الغلاف اللدن (الاستينوسفير) وهو طبقة تماثل في مكوناتها الصخرية مكونات الوشاح أعلاها مباشرة، إلا أنها أقل في الصلابة **rigidity** وأقل في المرونة **elasticity** أيضاً، مع أنها أكثر لدونة **ductile** عن المناطق المجاورة لها.

والتفسير المقبول لوجود نطاق السرعة المنخفضة، هو أن التدرج الحراري للأرض **geothermal gradient** في المنطقة بين 100 كم حتى 350 كم يصل

ولا تستطيع الموجات الزلزالية أن تدلنا على تركيب اللب، إلا أنها يمكن أن تساعدنا في التنبؤ بذلك. وتدل سرعة الموجات الزلزالية المحسوسة من زمن الانتقال أن كثافة الصخور تزيد ببطء من حوالي 3.3 جم/سم³ عند أعلى الوشاح إلى 5.5 جم/سم³ عند الجزء السفلي من الوشاح. ويقدر متوسط كثافة الكرة الأرضية عامة 5.5 جم/سم³. ولكي تتم معادلة القشرة والوشاح الأقل كثافة، فإن اللب يجب أن يكون مكوناً من مادة لها كثافة تتراوح بين 10-11 جم/سم³ على الأقل. ويمثل الحديد المادة الأكثر شيوعاً والأقرب لتحقيق ذلك. ويأتى الدليل على صحة هذا الاعتقاد من النيازك، حيث يعتقد أن النيازك الحديدية **iron meteorites** تمثل مادة لب كوكب صغير قديم تحطم الآن. وتحتوي معظم النيازك الحديدية على القليل من النيكل، وربما يكون الوضع مشابهاً في لب الأرض. وحيث إن الموجات الثانوية لا تنتقل بعد حد اللب - الوشاح، لذلك يستنتج أن اللب الخارجي يكون في حالة سائلة، ويتكون في معظمه من الحديد، ولكنه يحتوي أيضاً على النيكل وبقايا معادن سيليكاتية من الوشاح السفلى والتي توجد في حالة منصهرة.

4. اللب الداخلي

تدل انعكاسات الموجات الأولية (موجات P) على وجود لب داخلي صلب داخل اللب الخارجي السائل، ويبدو أن تركيبها متماثل عموماً. وربما يرجع السبب في التغير من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة إلى تأثير الضغط على درجة حرارة انصهار الحديد. ويرتفع الضغط بالقرب من مركز الأرض إلى قيمة تعادل ملايين المرات الضغط الجوي العادي، كما ترتفع درجة الحرارة ولكن ليس إلى الدرجة التي تلغى تأثير الضغط. وتعادل درجة الحرارة والضغط عند قاعدة

البلورية للمعادن تتغير مع العمق . حيث تزداد سرعة الموجات الزلزالية قليلا عند عمق 400 كم نتيجة للتغير في تركيب المعادن . وتسمى عملية إعادة ترتيب (تعبئة) الذرات ، والتي تحدث نتيجة التغير في درجات الحرارة والضغط بالانتقال متعدد الشكل polymorphic transition . فمعادن الأوليفين عند عمق 400 كم تعيد ذراته ترتيب نفسها في معدن متعدد الشكل polymorph أكثر كثافة ، ويتحول إلى تركيب يشبه ذلك الموجود في عائلة من المعادن تعرف باسم سبينيل spinels (معدن الماغنيتيت أحد المعادن التي تضمها تلك المجموعة).

وهناك زيادة في السرعة تحدث عند عمق 670 كم ، وهذا الانقطاع من الصعب تفسيره ، على الرغم من افتراض بعض العلماء أنه يحدث عند هذا الحد تكسر للمعادن إلى أكاسيد فلزات مثل أكسيد الحديد FeO وأكسيد الماغنسيوم MgO وأكسيد السيليكون SiO_2 . وهناك انقطاع ثالث يوجد عند عمق حوالى 1050 كم حيث تزداد عنده سرعة موجات P مرة أخرى . وتقع تلك الانقطاعات الثلاثة داخل نطاق يطلق عليه النطاق الانتقال **transitional zone** والذي يفصل بين الوشاح العلوى والوشاح السفلى.

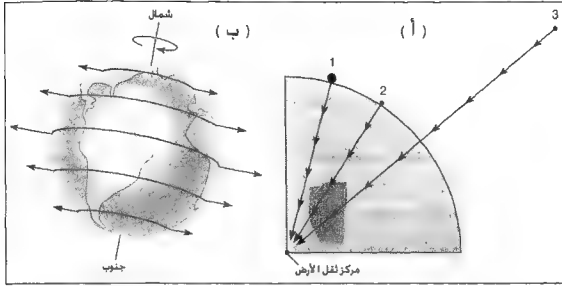
VI. الجاذبية الأرضية وتوازن القشرة الأرضية

أوضح سير إسحق نيوتن (1642-1727م) Sir Isaac Newton في قانونه العام عن الجاذبية أن قوة الجذب بين كتلتين تتناسب طرديا مع مادة تلك الكتلتين وعكسياً مع مربع المسافة بين مركزيهما (شكل 12.16) . ولذلك فإن قوة الجذب بين كتلتين كبيرتين مثل القمر والأرض يكون أكبر من الجاذبية بين جسمين تكون كتلتهما صغيرة . وعادة ، ما نشير إلى قوة الجاذبية بين جسم ما والأرض بأنه وزنه weight .

إلى درجات حرارة قريبة من بداية الانصهار الجزئى لصخر الوشاح . وإذا كان هذا التفسير صحيحا فإما أن شدة الصخر rock strength تنخفض بشكل حاد عند درجات الحرارة القريبة من الانصهار ، وإما أن الانصهار يبدأ وتتكون كمية صغيرة من السوائل التي تكون طبقة رقيقة جدا حول حبيبات المعادن ، والتي تعمل على تخفيف الاحتكاك . ويجب أن تكون كمية المادة المنصهرة قليلة جدا - في حالة افتراض حدوثها - لأن الموجات الثانوية (موجات S) تنتقل خلال هذا النطاق ، ونحن نعرف أن موجات S- لا تنتقل خلال السوائل . فأى سائل ، مثل غلالة مميكة من الزيت ، يعمل على تخفيف الاحتكاك بين حبيبات المعدن في الوشاح ، ويعمل في نفس الوقت على خفض سرعة الموجات نتيجة انخفاض صفات المرنة.

ويلاحظ أن نظرية تكتونية الألواح تفترض أن ألواح الغلاف الصخري للأرض تنزلق فوق نطاق لدن إلى حد ما في الوشاح . ومن هنا فإن وجود نطاق السرعة المنخفضة هذا يمثل عنصرا مهماً لنظرية تكتونية الألواح ، حيث إنه يثبت وجود الغلاف اللدن (الأسينوسفير) . ويتطابق الحد العلوى لنطاق السرعة المنخفضة مع الحد السفلى للغلاف الصخري . وهكذا ، فإن نطاق السرعة المنخفضة ينطبق مع الغلاف اللدن (الأسينوسفير) .

وقد حددت انقطاعات أخرى عند مستويات أعمق في الوشاح . وتمثل تلك الانقطاعات تغيرات في البنية البلورية وليس في المكونات المعدنية ، كما هو الحال عند الحدود (الانقطاعات) بين القشرة الأرضية والوشاح ، وبين الوشاح ولب الأرض . ويفترض الجيولوجيون أن الوشاح يتكون كله من المادة نفسها ، إلا أن البنية



شكل (22.16):

(أ) تمجذب الجاذبية الأرضية كل الأجسام نحو مركز ثقل الأرض . فالأجسام 1 و 2 تقع على البعد نفسه من مركز ثقل الأرض ، ولكن تكون قوة الجاذبية أكبر عند الجسم 1 نظراً لأنه أكثر ثقلاً . أما الأجسام 2 و 3 واللذان لهات الكتلة نفسها ، فإن الجاذبية الأرضية عند 3 تكون أقل أربع مرات منها عند 2 ويرجع ذلك إلى أن المسافة من مركز ثقل الأرض إلى 3 تكون ضعف المسافة من ذلك المركز إلى 2 .
(ب) يولد دوران الأرض قوة طرد مركزية تضاد قوة الجاذبية . وتكون قيمة قوة الطرد المركزي صفراً عند الأقطاب ، وتصل إلى قيمتها القصوى عند خط الاستواء .

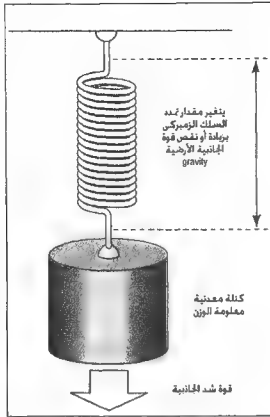
(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

الأرضية gravity على جسم عند أقطاب الأرض يكون أكبر قليلاً منه عند خط الاستواء . فالرجل الذي يزن حوالى 80.5 كجم عند القطب الشمالى نلاحظ أن وزنه ينقص ببطء وثبات إلى 80 كجم عند انتقاله إلى خط الاستواء . وإذا لاحظ الشخص المتقل من القطب الشمالى إلى خط الاستواء وزنه بدقة ، فإنه سيلاحظ أن وزنه يتغير بغير انتظام . ومن هنا ، فإننا نلاحظ أن الجاذبية الأرضية تتغير بغير انتظام . ولنفس السبب ، فإن وزن جسم ما يكون أقل قليلاً فوق سطح الأرض عن وزنه عند مستوى سطح البحر .

ويستخدم الجيوفيزييون جهازاً حساساً يسمى جرافيمتر (مقياس التناقل) gravimeter لقياس الاختلافات في قوة الجاذبية . وتشبه أجهزة التناقل

ومن المفترض أن تكون الجاذبية الأرضية ثابتة في كل مكان على سطح الأرض ، إذا كانت الأرض كروية تماماً ومتجانسة كلية ولا تدور . وحيث أن الأرض تدور ، فإن قوة الطرد المركزي التى تنشأ عن هذا الدوران يعادها جزئياً قوة الجاذبية الأرضية (شكل 22.16 ب).

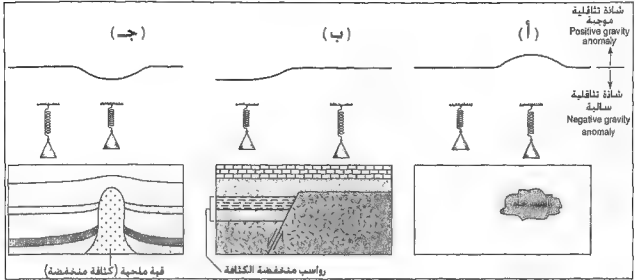
وقد أوضحت القياسات الدقيقة أن الأرض ليست كروية تماماً ، بل هى عبارة عن جسم يضاوى مسطح قليلاً عند الأقطاب ومتفتح قليلاً عند خط الاستواء . ويكون نصف قطر الأرض عند خط الاستواء أكبر بحوالى 21 كم منه عند الأقطاب . وحيث أن قوة الجاذبية التناقلية بين كتلتين تتناسب عكسياً مع مربع المسافة بين مركزيهما ، فإن الجذب الذى تسببه الجاذبية



شكل (23.16). يتكون الجرافيمتر (مقياس التناقل) من كتلة ثقيلة من المعدن معلقة بزنبرك حساس . وتشد الكتلة الزنبرك بقوة تنسب بتفسير الجاذبية الأرضية gravity من مكان لآخر ، حيث يشد الزنبرك بدرجات مختلفة . وتوضع الكتلة المعدنية والزنبرك في وعاء مفرغ من الهواء مع أدوات قياس حساسة.

وتكون قياسات الجاذبية الأرضية فوق راسب من خام الحديد أعلى منها فوق راسب غير متماسك نظراً لارتفاع كثافة خام الحديد عن الراسب المحيط به ، (شكل 24.16). وتسمى مثل تلك الانحرافات عن قوة الجاذبية الأرضية المتوقعة بشاذات تناقلية gravity anomalies . وتبدل القياسات فوق جسم خام الحديد على زيادة في مادة كثيفة أو بصورة أبسط زيادة الكتلة mass excess بين سطح الأرض ومركزها ، وتعتبر شاذة تناقلية موجبة positive gravity anomaly ، بينما يشير وجود شاذة تناقلية سالبة negative gravity anomaly فوق رواسب منخفضة الكثافة إلى نقص الكتلة mass deficiency ، نظراً لأن قوة جاذبية الأرض أقل عن المتوسط المتوقع ، (شكل 24.16 ب). وتوجد أيضاً الشاذات التناقلية

مسجلات الزلازل (أجهزة السيزموجراف) ذات الفصوص الذاتي . فتكون أجهزة التناقل من كتلة ثقيلة معلقة في زنبرك حساس (شكل 23.16). وحينما تكون الأرض مستقرة ، ولا يوجد اهتزاز نتيجة الزلازل ، فإن قوة الجذب التي تؤثر على الزنبرك نتيجة الكتلة الثقيلة تمثل مقياساً دقيقاً للجذب التناقلي gravitational pull ، حيث إنها تستجيب لأي تغيرات في الجاذبية الأرضية . وقد استخدمت أجهزة قياس التناقل في عمليات البحث عن خامات الهيدروكربونات وغيرها من الخامات المعدنية ، حيث تأكد الجيولوجيون من وجود شاذات تناقلية فوق الأجسام المدفونة ، مثل معادن الخام (الركاز) ore minerals وقباب الملح . كما يمكن تحديد بعض التراكيب الجيولوجية باستخدام أجهزة مقياس التناقل فوق سطح الأرض (شكل 24.16).



شكل (24.16): قياس قوة الجاذبية الأرضية فوق أجسام مختلفة الكثافة.

(أ) تشد الكتلة المعدنية المعلقة من زنبرك في جهاز الجرافيمتر لأسفل فوق الجسم الكثيف بقوة أكبر من قوة الشد فوق المناطق المجاورة لها، مما يدل على وجود شاذة ثقالية موجبة positive gravity anomaly فوق الجسم المعدني.

(ب) كما توجد شاذة ثقالية سالبة فوق التراكيب المدفونة buried structures.

(ج) الملح الصخري أقل كثافة من معظم أنواع الصخور الأخرى. ويعطي مسح الجاذبية للبقعة الملحبة شاذة ثقالية سالبة.

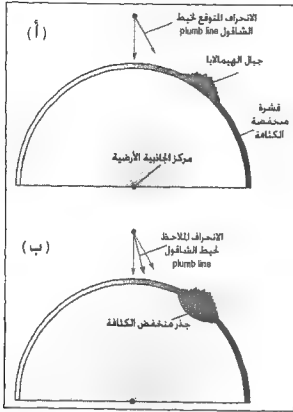
(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

ولقد أرجع هذا الفرق رغم صغره، إلى انحراف خيط الشاقول plumb عن الرأسى نتيجة تأثير جبال الهيمالايا الضخمة المجاورة (الشاقول هو كتلة مخروطية من الرصاص معلقة في خيط تستعمل لإسقاط نقطة رأسياً في الفراغ لمسافة قصيرة) (شكل 25.16). وقد قدر أن تأثير جبال الهيمالايا يكون أكبر في المدينة الأقرب لسلسلة الجبال. وبعد عدة سنوات، قام برات J.H. Bratt بتقدير كتلة الهيمالايا، كما قام بحساب الخطأ الذي ينتج عن تأثير جاذبية جبال الهيمالايا. وقد أصابته الدهشة عندما اكتشف أن الجبال يجب أن تسبب خطأ أكبر بثلاثة أضعاف الخطأ الملاحظ فعلياً، مما دفعه إلى اقتراح وجود لب مركزي خال تحت تلك الجبال.

السالبة فوق قباب الملح (شكل 24.16 ج) وعند نقاط الاندساس مما يشير إلى أن القشرة الأرضية ليست في حالة اتزان.

أ. قاعدة توازن القشرة الأرضية

قام المساحون البريطانيون عند عمل أول مسح طوبوغرافي في الهند بإجراء قياسات للمسافة بين مدينتين تقعان جنوب سلسلة جبال الهيمالايا وتبعدان عن بعضها بحوالى 600 كم باستخدام طريقتين مختلفتين. وتعتمد الطريقة الأولى للقياس على طرق المساحة التقليدية، بينما تعتمد الثانية على استخدام الطرق الفلكية. وعلى الرغم من أن الطريقتين يجب أن تعطيا النتائج نفسها، إلا أنه لوحظ وجود فرق في المسافة المقدرة بالطريقتين، قدرت بحوالى 177 متراً.



شكل (25.16):

(أ) خط الشاقول plumb line يكون رأسياً دائماً ، ويشير إلى مركز الجاذبية الأرضية . (الشاقول هو كتلة غروبية من الرصاص معلقة في خيط تستخدم لإسقاط نقطة رأسياً في الفراغ لمسافة قصيرة) ، ومن المتوقع أن ينحرف خط الشاقول هذا قرب السلاسل الجبلية ، إذا كانت مكونة من مادة منخفضة الكثافة والجبال أكثر سمكاً ، ومركزة على مادة ذات كثافة أعلى .

(ب) وقد لوحظ عند مسح الهند أن الانحراف الحقيقي لخط الشاقول أقل من المتوقع ، ويفسر ذلك بافتراض أن جذور جبال الهيمالايا تتكون من مادة ذات كثافة منخفضة .

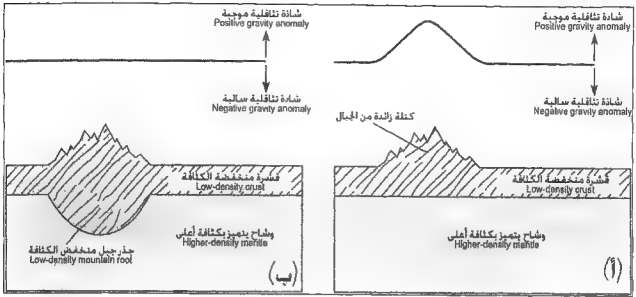
(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

منطقة جبلية لابد أن يظهر شاذة ثقافية موجبة هائلة. ويرجع السبب في عدم وجود تلك الشاذة إلى أنه لا يوجد زيادة في الكتلة. ولذلك فإن بعض صخور الوشاح الكثيف يجب أن يحمل عليها صخور قشرة أخف (شكل 26.16). وقد أثبتت الدراسات الزلزالية أيضاً وجود جذور منخفضة الكثافة تحت الجبال.

ويسمى اقتراح إيرى الآن بقاعدة توازن القشرة الأرضية (أيزوستاسي) principle of isostasy . وطبقاً لهذه القاعدة فإن القشرة الأرضية تكون في حالة توازن ، ويمكن مقارنتها بطفو الكتل المكونة للغلاف الصخري فوق الغلاف اللدن (الاستينوسفير) الأكبر كثافة. وتشير تلك القاعدة إلى وجود جذور من صخور القشرة الأرضية المنخفضة الكثافة ممتدة ومنغرس في صخور الوشاح الأكبر كثافة ؛ لتدعيم القارات

وبعد عدة سنوات ، وفي عام 1865م اقترح سير جورج إيرى Sir George Airy أنه بالإضافة إلى نتوء جبال الهيمالايا لأعلى فوق مستوى سطح البحر ، فإن جبال الهيمالايا والجبال الأخرى أيضاً ، تمتد لمسافة كبيرة تحت سطح الأرض وأن لها جذوراً تتكون من مادة قليلة الكثافة. وبمعنى آخر ، فإن الجبال تطفو فوق صخور عالية الكثافة في الأعماق ، وأن كتلة الجبال الزائدة فوق مستوى سطح البحر يعادها نقص في الكتلة عند الأعماق. وقد تسبب هذا النقص في الكتلة في انحراف خط الشاقول أثناء عملية مسح الأرض في الهند.

وقد أظهرت دراسة الجاذبية الأرضية أن الجبال لها جذور تتكون من مواد منخفضة الكثافة تمتد في الوشاح. وإذا افترضنا عدم وجود هذا الجذر منخفض الكثافة ، فإن المسح الثقالي gravity survey في



شكل (16.26):

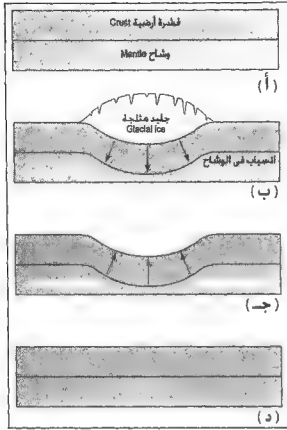
- تدل قياسات الجاذبية على امتداد الخط المين وجود شذوة ثقالية موجبة فوق الجبال ، إذا كانت الجبال مكونة من قشرة أرضية أكبر سمكا وترتكز على مادة ذات كثافة أكبر أسفلها .
 - ويدل مسح الجاذبية الفعل عبر المناطق الجبلية أنه لا يحدث تغير عن التوقع ، وبالتالي لا توجد شذوة ثقالية . ويدل ذلك على أن كتلة الجبال فوق سطح الأرض يجب أن تتعادل في العمق بمادة ذات كثافة منخفضة تحل محل المادة الأكثر كثافة .
- (After Monroe, J.S. and Wickander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

والجبال. ويمكن فهم هذه القاعدة بسهولة إذا ما فورنت بجبل الجليد . فالجليد أقل كثافة من الماء بنسبة ضئيلة ، ولذلك فهو يطفو . وطبقاً لقاعدة أرشميدس للطفو ، فإن جبل الجليد يفوص في الماء حتى يزيع حجما من الماء مساو لوزنه الكلى . وعندما يفوص جبل الجليد ليصل إلى حالة اتزان ، فإن حوالى 10٪ من حجمه تبرز فوق سطح الماء. فإذا انصهر بعض الجليد فوق مستوى سطح الماء ، فإن جبل الجليد يرتفع لكى يحافظ على النسبة نفسها من الجليد فوق سطح الماء وتحت.

والجبال. ويمكن فهم هذه القاعدة بسهولة إذا ما فورنت بجبل الجليد . فالجليد أقل كثافة من الماء بنسبة ضئيلة ، ولذلك فهو يطفو . وطبقاً لقاعدة أرشميدس للطفو ، فإن جبل الجليد يفوص في الماء حتى يزيع حجما من الماء مساو لوزنه الكلى . وعندما يفوص جبل الجليد ليصل إلى حالة اتزان ، فإن حوالى 10٪ من حجمه تبرز فوق سطح الماء. فإذا انصهر بعض الجليد فوق مستوى سطح الماء ، فإن جبل الجليد يرتفع لكى يحافظ على النسبة نفسها من الجليد فوق سطح الماء وتحت.

وهناك مثال تقليدى تمدنا به المثال خلال العصور الجليدية . فعندما غطت فرش جليدية قارية continental ice sheets أجزاء من أمريكا الشمالية خلال حين البليستوسين ، فقد تسبب الوزن المضاف

وإذا كان مفهوم توازن القشرة الأرضية (أيزوستاسى) صحيحاً ، فإننا نتوقع أن تغوص القشرة



شكل (27.16): شكل توضيحي يوضح كيف تتوازن القشرة الأرضية عند إضافة غطاء من جليد الخالق فوقها.

- (أ) شكل القشرة والوشاح قبل حدوث الثلج
(ب) يضغط وزن جليد الثلجة glacier على القشرة فتفوص في الوشاح
(ج) وعندما ينصهر الجليد يبدأ الارتداد الأيزوستاسي isostatic rebound، وتبدأ القشرة في الرجوع إلى وضعها الأول
(د) يكتمل الارتداد الأيزوستاسي بعودة القشرة إلى وضعها الأصلي.

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition, West Publishing Company, Minneapolis).

الملخص

1. الزلازل هي اهتزاز الأرض بسبب الموجات الزلزالية التي تنطلق من صدع ينكسر فجأة، حيث تنطلق الطاقة المختزنة بمرونة في صورة موجات زلزالية. وتقاس ذبذبات الزلازل باستخدام أجهزة السيزموجراف (مسجلات الزلازل).
2. تنطلق الطاقة من بؤرة الزلزال للخارج كموجات داخلية (موجات جسمية)، تشمل نوعين: موجات أولية (موجات P) وهي موجات تضاعفية تنتقل في المواد الصلبة والسائلة والغازية، وموجات ثانوية (موجات S) وهي موجات قص تنتقل خلال المواد الصلبة فقط،

لكثلة الجليد البالغ سمكها حوالي 3 كم في قعر القشرة الأرضية. وقد أعقب انصهار الجليد، في الفترة من 8000 إلى 10000 سنة مضت ارتفاع منطقة خليج هدسون Hudson Bay في كندا، ومازالنا اسكندنافيا، التي غطتها فريشة جليدية واسعة منذ حوالي 10000 سنة، في حالة ارتداد أيزوستاتيكي بمعدل يبلغ حوالي مترًا واحدًا لكل قرن. وقد ارتفعت المدن الساحلية في اسكندنافيا بسرعة لدرجة أن أرضها الشحن والتفريغ، والتي بنيت منذ عدة قرون مضت تقع بعيداً عن الشاطئ الآن.

7. يؤدي دراسة انعكاس وانكسار الموجات الزلزالية إلى استنتاج التركيب الداخلي للأرض ، حيث توجد حدود مميزة في التركيب بين القشرة والوشاح ، وبين الوشاح واللب الخارجي .
8. تحدد قاعدة القشرة الأرضية وجود انقطاع زلزالي مميز يسمى انقطاع موهروفيثش . ويتراوح سمك القشرة من 20-60 كم في المناطق القارية ، بينما يكون أقل من 10 كم تحت المحيطات . ويوجد داخل الوشاح نطاقين عند عمق 400 و 670 كم حيث يتسبب تغير الكثافة فجأة في وجود انقطاعات للموجات الزلزالية .
9. يتميز اللب بكتافته العالية ، ويستنتج من ذلك أنه يتكون من الحديد بالإضافة إلى كميات صغيرة من العناصر الأخرى . ويميز اللب الخارجي بأنه سائل ؛ حيث إن الموجات الثانوية (موجات S) لا تنتقل خلاله ، بينما يكون اللب الداخلي في حالة صلبة .
10. يوجد بين عمق 100 كم وحتى 350 كم نطاق السرعة المنخفضة . ويتطابق نطاق السرعة المنخفضة مع الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) . ويعلو الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) الغلاف الصخري الذي يتميز بأنه صلب ، ويصل سمكه إلى 100 كم في المتوسط .
11. توجد الأجزاء الخارجية من الأرض في حالة توازن (أيزوستاسي) تقريباً . فمثلاً تطفو جبال الجليد الضخمة فوق الماء فإن الغلاف الصخري يطفو فوق الغلاف اللدن .
- وتتحرك بحوالى نصف سرعة موجات P . كما تتسبب طاقة الزلزال في اهتزاز سطح الأرض أيضاً نتيجة الموجات السطحية التي تتحرك بسرعة أقل بكثير من الموجات الداخلية .
3. يمكن تحديد موقع البؤرة الزلزالية والمركز السطحي للزلزال عن طريق قياس الفرق بين زمن وصول كل من موجات P وموجات S .
4. يقاس مقدار الطاقة المنطلقة خلال زلزال على مقياس ريختر لقدر الزلازل . ويجرى التقدير من تسجيلات السيزموجراف (مسجلات الزلازل) للموجات الزلزالية الداخلية (الجسمية) .
5. تنشأ حوالى 95% من زلازل الأرض في الحزام حول الهادئ (80%) وحزام البحر المتوسط - الهيبالايا (10%). وتنشأ الخمسة في المائة الباقية على امتداد حورد وسط المحيط وغيرها من الأماكن . وتحدد أحزمة الزلازل حدود الألواح التكتونية ، حيث تنشأ معظم الزلازل بالقرب من حدود الألواح . كما تحدد الحركة الأولى للموجة الزلزالية اتجاه الحركة عند حد اللوح . وتوضح الأعداد القليلة من الزلازل التي تنشأ بعيداً عن حدود الألواح مدى شدة القوى التكتونية التي تسبب التصدع داخل الألواح .
6. يمكن أن تتسبب اهتزازات الأرض في دمار وتخريب المنشآت ، كما يمكن أن تحفز الانهيارات الأرضية . كما أن اندلاع الحرائق هو رعب آخر يمكن أن يلحق بالزلازل . وقد تتسبب الزلازل على قاع المحيطات في حدوث موجات زلزالية بحرية (تسونامي) والتي قد تتسبب في دمار شامل عندما تصل إلى المياه الضحلة عند الشواطئ .

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

<http://www.gps.caltech.edu/seismo/seismo.page.html>

http://www.eas.slu.edu/Earthquake_Center/earthquakecenter.html

<http://www.geophys.washington.edu/seismosurfing.html>

<http://www.neic.cr.usgs.gov/>

http://sepwww.stanford.edu/oldsep/joe/fault_images/BayAreaSanAndreasFault.html

المصطلحات المهمة

aseismic ridge	حيد لا زلزالي	Moho	موهو
Benioff zone	نطاق بيني أوف	Mohorovicic discontinuity	انقطاع موهوروڤيتش
body waves	موجات داخلية (موجات جسمية)	primary waves	موجات أولية
earthquake	زلزال - هزة أرضية	Richter magnitude scale	مقياس ريختر لقدر الزلازل
elastic rebound theory	نظرية الارتداد المرن	secondary waves	موجات ثانوية
epicenter	المركز السطحي للزلزال	seismic belts	أحزمة زلزالية
focus	بؤرة (زلزالية)	seismic gap method	طريقة الفجوة الزلزالية
gravimeter	جرافيمتر (مقياس الثقل)	seismic sea waves	موجات بحرية زلزالية
gravity anomalies	شاذات ثقالية	seismic waves	موجات زلزالية
intensity	شدة الزلزال	seismograph	سيزموجراف (مسجل الزلازل)
inertia	قصور ذاتي	seismology	علم الزلازل
isostasy, principle of	قاعدة توازن القشرة الأرضية (أيزوستاسي)	shadow zone	نطاق الظل
low-velocity zone	نطاق السرعة المنخفضة	surface waves	موجات سطحية
magnitude	قدر الزلزال	transitional zone	نطاق انتقال
M- discontinuity	انقطاع - إم	tsunami	تسونامي
Modified Mercalli Intensity Scale	مقياس شدة ميركالي المعدل		

الأسئلة

- 1- ما أسباب الزلازل؟
- 2- ما العلاقة بين بؤرة الزلزال والمركز السطحي للزلزال المقابل لتلك البؤرة؟
- 3- كيف يمكن تسجيل وقياس الموجات الزلزالية؟ وكيف يمكن تحديد موقع المركز السطحي للزلزال من تسجيلات الزلازل؟ اشرح كيف يمكن تحديد البؤرة الزلزالية.
- 4- اشرح الفرق بين الموجات الزلزالية الداخلية (الجسمية) والموجات السطحية. حدد نوعين من الموجات الزلزالية الداخلية وشرح الفرق بينهما.
- 5- وضع كيف يستخدم الجيولوجيون مقياس ريختر لتقدير الطاقة المنطلقة من الزلازل، وما أقل قدر لزلزال على مقياس ريختر يجعلنا نشعر بالزلزال؟
- 6- ناقش باختصار الآثار المدمرة للزلازل.
- 7- كيف يؤثر الانعكاس والانكسار على مسار الموجات الزلزالية؟ كيف يمكن استخدام كل من الانكسار والانعكاس لتحديد قاعدة القشرة الأرضية؟ وحد بين اللب والوشاح؟
- 8- اشرح باختصار كيف يمكن استخدام الموجات الزلزالية لاستنتاج أن اللب الخارجي يكون سائل بينما اللب الداخلي في حالة صلبة. كيف تعضد
- النيازك الحديدية، أن اللب يتكون في معظمه من الحديد الفلزى؟
- 9- وضع كيف تختلف سرعة موجات P في الجرانيت عنها في الجابرو والبريدوتيت.
- 10- ما الدليل الذي يرجح أن الغلاف اللدن (الاستينوسفير) في حالة انصهار جزئي؟
- 11- ما الأحزمة الزلزالية؟ وما علاقتها بالألواح التكتونية؟ اشرح كيف يمكن استخدام تسجيلات الموجات الزلزالية لتحديد حركات حدود الألواح. اذكر أنواع تلك الحدود.
- 12- كيف يمكن مقارنة بؤر الزلازل مع الأنواع الثلاثة لحدود الألواح؟
- 13- توجد أحيانا بعض الزلازل المدمرة داخل الألواح، بعيدا عن حدود الألواح. لماذا؟
- 14- اشرح الشاذات الثقالية وكيف يمكن قياسها؟
- 15- اذكر بعض الأدلة على ارتباط شكل تضاريس سطح الأرض وتوازن القشرة الأرضية، وما العلاقة بين تضاريس سطح الأرض وتوازن القشرة الأرضية (الايزوستاسي)؟
- 16- كيف يمكنك استخدام الموجات الزلزالية لتحديد موقع غرفة صهارة (في حالة منصهرة) في القشرة؟

الفصل

17

تكتونية الألواح : نظرية شاملة

١. الأفكار الأولى عن الانجراف القارى
٢. فرضية الانجراف القارى: فكرة قبل موعدها
٣. دلائل الانجراف القارى
 - أ. التشابه بين التباينات الصخرية وسلاسل الجبال
 - ب. دليل من المثالج
 - ج. أدلة من الحفريات
 - د. المغناطيسية القديمة والتجوال القطبي
٤. انتشار قيعان المحيطات
 - أ. الانعكاسات المغناطيسية والانجراف القارى
 - ب. الحفر البحرية العميق: إثبات لفرضية انتشار قيعان المحيطات
٧. نظرية تكتونية الألواح
 - أ. حدود الألواح
 ١. الحدود المتباعدة
 ٢. الحدود المتقاربة
 ٣. الحدود الناقلة
 - ب. حركة الألواح
 ١. الحركة النسبية للألواح
 ٢. الحركات المطلقة للألواح
 ٣. التغير في سرعة الألواح
 ٤. الميكانيكية المحركة لتكتونية الألواح
٤. تكتونية الألواح والرواسب المعدنية

وسوف نستعرض في الأجزاء التالية الفرضيات المختلفة التي سبقت نظرية تكتونية الألواح ، لشرح الدلائل التي أدت إلى قبول البعض لفكرة حركة القارات والبعض الآخر لرفضها .

1. الأفكار الأولى عن الانجراف القاري

لقد كان معروفا منذ أمد بعيد أن جغرافية الأرض تتغير عبر الزمان . فقد لاحظ سير فرانسيس بيكون Sir Francis Bacon عام 1620م التشابه الكبير بين خطوط الشواطئ الغربية لأفريقيا وخطوط الشواطئ الشرقية لأمريكا الجنوبية . إلا أن يكون لم يجد أى علاقة بين القارات القديمة والحديثة ، وأن تلك القارات ربما كانت مختلفة في الماضي . وفي عام 1801م لاحظ الكسندر فون هوبولت الملاحظة نفسها ، ولكنه أرجع ذلك التشابه إلى التعرية على امتداد وادي كبير ، ولم يرجعها إلى تكسر قارة أكبر .

كما ذكر انطونيو سنيدر بليجريني Antonio Snider - Pellegrini 1858م في كتابه "الخلق وأسراره" وهو أحد المراجع الأولى عن الانجراف القاري ، أن كل القارات كانت متصلة مع بعضها خلال عصر البسلفاني (العصر الكربوني المتأخر) ثم انفصلت بعد ذلك . وقد بنى اعتقاده هذا اعتمادا على التشابه بين الحفريات النباتية في طبقات الفحم من زمن البسلفاني في أوروبا وأمريكا الشمالية . وقد عزى سنيدر انفصال القارات إلى طوفان ثوراتي (مذكور في التوراة) .

وفي نهاية القرن التاسع عشر لاحظ الجيولوجي النمساوي إدوارد سويس Edward Suess التشابه

حدثت ثورة في العلوم الجيولوجية عندما عُرف أن جغرافية الكرة الأرضية تتغير باستمرار عبر الزمن . وعلى الرغم من أن نظرية تكتونية الألواح مازالت غير واضحة بدرجة كافية لدى الكثيرين ، إلا أن لتكتونية الألواح تأثيرا قويا على كل جوانب حياتنا . فمن المؤكد أن الزلازل والبراكين لا تتوزع بصورة عشوائية على سطح الأرض ، وإنما تحدث بالقرب من حواف الألواح . وعلاوة على ذلك ، فإن هناك علاقة بين الألواح وطرق تكوين وتوزيع عديد من الرواسب المعدنية المهمة ، مثل الخامات الفلزية . ولذلك يستخدم الجيولوجيون نظرية تكتونية الألواح في تفسير تواجدها الرواسب المعروفة وفي البحث عن رواسب معدنية جديدة .

كما تشرح النظرية كيف تنشأ القارات وأحواض المحيطات وسلاسل الجبال ، والتي تؤثر على الغلاف الجوي للأرض ودورة الماء في المحيطات اللتان تحدان وتؤثران بصورة أساسية في مناخ الكرة الأرضية . ولذلك ، فقد أثرت حركة الألواح بصورة كبيرة على التوزيع الجغرافي للنباتات والحيوانات وتطورها وانقراضها .

وفي الوقت الحالي يمكن اعتبار نظرية تكتونية الألواح مقبولة عالميا تقريبا بين كافة الجيولوجيين . وقد أدى تطبيقها إلى فهم كيف تطورت الأرض منذ نشأتها وحتى الآن . وتفسر تلك النظرية الشاملة عديداً من الأحداث الجيولوجية التي يبدو أنه لا رابط بينها ، مما سمح للجيولوجيين بالنظر إلى تلك الأحداث كجزء من عملية مستمرة ، أكثر منها سلسلة من الأحداث المنعزلة غير المترابطة .

II. فرضية الانجراف القارى: فكرة قبل موعدها

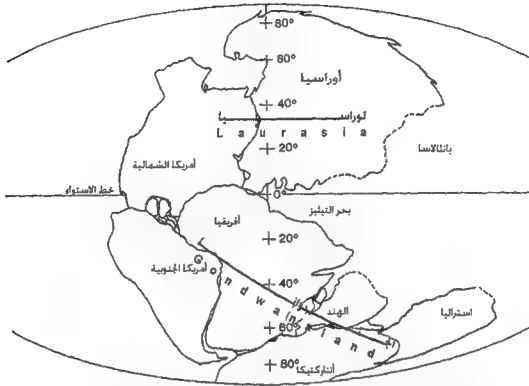
يرجع الفضل عموماً في تطور فرضية الانجراف القارى **continental drift** إلى عالم الأرصاد الجوية ألفريد فاجنر Alfred Wegener. ففي عام 1912م قدم فاجنر أفكاره الأولى عن القارات المتحركة. وقد اقترح فاجنر في كتابه المنشور عام 1915م بعنوان "أصل القارات والمحيطات" أن كل الكتل الأرضية كانت متحدة أصلاً في قارة عظمى واحدة أسماها بانجيا **Pangaea** (القارة الأم) من اليونانية بمعنى "كل الأرض" (شكل 1.17). وقد أوضح فاجنر مفهومه عن تحرك القارات في سلسلة من الخرائط توضح انفصال البانجيا قبل حوالي 200 مليون سنة، وتحرك القارات المختلفة إلى مواقعها الحالية. وقد جمع فاجنر كمية هائلة من الأدلة الجيولوجية والحفرية والمناخية لدعم فرضية الانجراف القارى. وقد كان رد فعل العلماء الأولى لفكاه متبايناً. حيث عارضها كثير من العلماء وخاصة في أمريكا الشمالية، بينما جاءه بعض التأييد من علماء آخرين. وقد كانت العقبة الأساسية لقبول فرضية الانجراف القارى هي تفسير الميكانيكية التي تحركت بها قارات مكونة أساساً من الصخور الجرانيتية فوق قشرة محيطية بازلتية ذات كثافة أعلى.

ومع ذلك فقد طور الجيولوجى البارز من جنوب أفريقيا الكسندر دى تواتر Alexander du Toit البراهين التي قدمها فاجنر، وجمع المزيد من الأدلة الجيولوجية والحفرية لدعم الانجراف القارى. وفي عام 1937م نشر دى تواتر كتابه باسم "قارتنا المتجولة"، حيث قارن رواسب الجليد في قارة الجندوانا برواسب الفحم الموجودة في صخور من العمر نفسه في قارات النصف الشمالى للكورة الأرضية. ولكى يحل هذه

بين الحفريات النباتية لحقب الحياة القديمة (الباليوزوى) المتأخر في الهند وإستراليا وأفريقيا وأنتاركتيكا وأمريكا الجنوبية، علاوة على الدليل على التلج في تتابعات الصخور الموجودة في تلك القارات. وفي عام 1885م اقترح سويس اسم أرض الجندوانا **Gondwanaland** (أو جندوانا **Gondwana** كما تسمى أحياناً) لقارة عظمى مكونة من كل القارات الجنوبية. وجندوانا هو إقليم يقع في شرق الهند حيث وجدت أدلة على حدوث تلج يغطي منطقة واسعة، بالإضافة إلى وفرة حفريات الجلوسويتيريس **Glossopteris** النباتية. وقد اعتقد سويس أن توزيع الحفريات النباتية والرواسب الثلجية يرجع إلى وجود جسور ممتدة تصل بين القارات ثم غرقت بعد ذلك تحت المحيطات.

وفي عام 1910م نشر الجيولوجى الأمريكى فرانك تيلور Frank B. Taylor بحثاً قدم فيه نظريته الخاصة عن الانجراف القارى، وذكر فيه أن تكون سلاسل الجبال يكون نتيجة للحركة الجانبية للقارات. كما اعتبر تايلور القارات الحالية أجزاء من قارات قطبية أكبر تكسرت في النهاية وهاجرت نحو خط الاستواء بعد أن بطأت الكرة الأرضية من دورانها نتيجة لقوى مد وجزر هائلة. وقد افترض تيلور أن قوى المد والجزر قد نشأت منذ حوالي 100 مليون سنة فقط.

وعلى الرغم من معرفتنا أن الميكانيكية التي اقترحها تيلور غير صحيحة، إلا أن أحد أهم مساهماته كان اقتراحه أن حيد وسط الأطلنطى **Mid-Atlantic Ridge** والتي اكتشفها البعثات البريطانية خلال الفترة 1872-1876م، ربما يحدد الموقع الذى انفصلت على امتداده قارة قديمة لتكون المحيط الأطلنطى الحالى.



شكل (1.17): البانجيا (القارة الأم) Pangaea التي تكونت قبل 220 مليون سنة عند نهاية حقبة الباليوزوي . وقد رسمت القارات الحالية بحيث يسهل تمييزها في هذا الشكل . كما أن المحيط العملاق في هذا الوقت والذي أطلق عليه البانثالاسا Panthalassa قد انكمش ويتمثل حالياً بالمحيط الهادئ . وتشمل لوراسيا كلا من أمريكا الشمالية وجرينلاند ، بالإضافة إلى أوروبا وآسيا ، بينما تشمل الجندوانا بقية الكتل القارية. (After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

III. دلائل الانجراف القاري

لقد كان فاجنر مأخوذاً بالتشابه بين خطوط شواطئ القارات على جانبي المحيط الأطلنطي ، خاصة بين أمريكا الجنوبية وأفريقيا ، مثل من سبقه من العلماء . وقد أوضح فاجنر أن ذلك التشابه هو دليل على أن القارات كانت متصلة يوماً ما كقارة عظيمة ، ثم انشطرت لاحقاً . وقد لقيت محاولة فاجنر لإعادة تركيب جانبي المحيط الأطلنطي اعتياداً على تشابه الشواطئ الحالية معارضة من العلماء ، نظراً للتفسير الدائم لخطوط الشواطئ نتيجة التعرية والترسيب . لذلك فلو أن القارات قد انفصلت خلال حقبة الحياة الوسطى (الميزوزي) كما اقترح فاجنر فإن خطوط الشواطئ الحالية لها لن تتطابق تماماً على بعضها.

الإشكالية ، حرك دى توارات الجندوانا إلى القطب الجنوبي وجمع القارات الشمالية الموجود بها رواسب الفحم مع بعضها عند خط الاستواء . وسمى هذه الكتل الشمالية لوراسيا Laurasia وهي تشمل أمريكا الشمالية وجرينلاند وأوروبا وآسيا الحالية (باستثناء الهند).

وعلى الرغم من هذه الأدلة والبراهين ، إلا أن معظم الجيولوجيين استمروا في معارضتهم وعدم قبولهم لفكرة تحرك القارات . وقد استمر الوضع على ما هو عليه حتى عام 1960 م حينما قدمت بحوث علم المحيطات أدلة مقنعة أن القارات كانت متصلة يوماً ما ثم انفصلت لاحقاً ، مما أدى آخر الأمر إلى قبول واسع لفرضية الانجراف القاري .



شكل (2.17): مطابقة الكتل القارية عبر المحيط الأطلنطي عند حواف المنحدرات القارية المغمورة، وليس عند خطوط الشواطئ الحالية. وقد ظهرت الحواف المغمورة للقارات بشكل منقطع، ويشير اللون الأسود إلى المناطق التي تراكبت فيها حواف القارات فوق بعضها (وهي المناطق التي تراكبت فوقها الصخور الرسوبية) بينما تمكس الأجزاء البيضاء بينها المناطق الناقصة من عملية التراكب.

(After Bullard, E.C., Everett, J.E. and Smith, A.G., 1965: The Fit of the continents around the Atlantic, philosophical transaction of the Royal Soc., London).

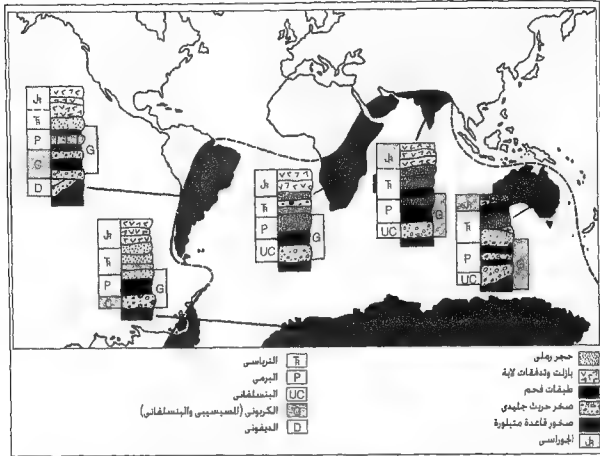
تتبع نفس العمر في المناطق المتقابلة على القارات المتباعدة إلى حد بعيد. وهذا هو الحال في قارة الجندوانا (شكل 3.17). حيث تتماثل تقريبا تتابعات الصخور البحرية وغير البحرية والجليدية التي تتبع البنسلفاني (التابع للعصر الكربوني المتأخر) إلى الجوارسي، في كل قارات الجندوانا الخمس، مما يشير إلى أن تلك القارات كانت ملتصقة ببعضها يوما ما.

ويدعم اتجاه عديد من سلاسل الجبال الرئيسية فرضية الانجراف القاري، حيث تنتهي هذه السلاسل من الجبال ظاهريا عند خط الشاطئ لقارة ما لتستمر ظاهريا في قارة أخرى عبر المحيط. فمثلا تتجه جبال الأبالاش في أمريكا الشمالية في اتجاه الشمال الشرقي في شرق الولايات المتحدة الأمريكية وكندا، ثم تنتهي فجأة عند شاطئ نيوفونلاند (شكل 4.17). وتوجد سلاسل جبال تتبع العمر نفسه ولها نظام الطي نفسه في شرق جرينلاند وأيرلندا وبريطانيا والنرويج. وعلى الرغم من أن المحيط الأطلنطي يفصل بين تلك

وقد كان من المنطقي أن تتم مطابقة القارات مع بعضها على امتداد المنحدر القاري continental slope حيث تقل التعرية إلى أقصى درجة. ويجب ملاحظة أن الحافة الحقيقية للقارة تكون تحت المنحدر القاري حيث تتغير القشرة القارية إلى قشرة محيطية. وفي عام 1965م قام سير إدوارد بولارد Sir Edward Bullard الإنجليزي واثان من مرافقيه برسم خريطة باستخدام الحاسوب (الكمبيوتر)، تم فيها مطابقة القارات عند عمق 2000 متر عند حواف المنحدرات القارية. ويوضح شكل (2.17) التوافق الواضح بين حواف القارات، وعلى الرغم من وجود بعض المناطق القليلة التي تراكبت فيها حواف القارات. ويرجع هذا التراكب إلى وجود مجارى مائية رسبت كميات كبيرة من الرواسب في مناطق مختلفة.

أ. التشابه بين التتابعات الصخرية وسلاسل الجبال

إذا كانت القارات قد اتصلت ببعضها يوما ما، فإنه من المتوقع أن تتماثل الصخور وسلاسل الجبال التي



شكل (3,17) : تتأثر تقريبا في كل قارات الجندوانا التتابعات البحرية وغير البحرية والجليدية من البنسلفاني التاسع للمصر الكربوني المتأخر حتى الجوراسي . ويرجع هذا التشابه القوي إلى أن القارات المكونة للجندوانا كانت ملتصقة ببعضها في يوم ما . ويشير الحرف (G) إلى مناطق انتشار للثورة الجلوسوثيريس .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

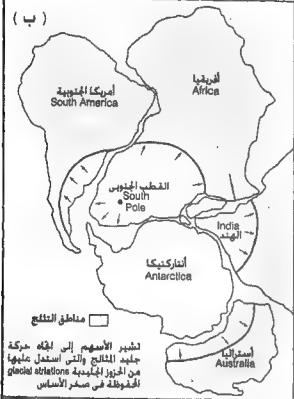
السلاسل الجبلية ، إلا أنها تكوّن سلسلة جبال مستمرة، حينها يعاد وضع تلك القارات بجانب بعضها البعض.

ب. دليل من المثلج

لقد غطت مثلج glaciers ضخمة مساحات قارية كبيرة في نصف الكرة الأرضية الجنوبي في حقبة الحياة القديمة (الباليوزوي) المتأخر . ويدل على حدوث تلك المثلج وجود طبقات من الحريث till (وهي رواسب كونتها المثلج) ، بالإضافة إلى الحزوز الجليدية الموجودة في صخر الأساس الذي يسفل رواسب الحريث . وتدل الحفرجات والصخور الرسوبية التي تتبع العمر نفسه في نصف الكرة الأرضية الشئالي على عدم وجود أى أدلة

على التلج ، وإنما تدل الحفرجات النباتية في الفحم على أن مناخ نصف الكرة الشئالي كان مناخا مداريا خلال الزمن نفسه الذي سادت فيه المثلج في نصف الكرة الأرضية الجنوبي .

وتقع اليوم كل قارات الجندوانا ما عدا القارة القطبية الجنوبية (الأنتاركتيكا) بالقرب من خط الاستواء ، حيث يسود بها مناخ مداري إلى شبه مداري. وتدل الخرائط التي رُسمت للحزوز الجليدية glacial striations في صخور الأساس في أستراليا والهند وأمريكا الجنوبية أن المثلج تحركت من المحيطات إلى

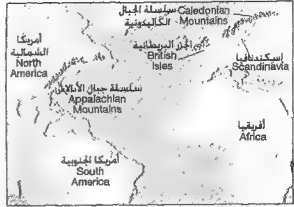


شكل (5.17):

أ- إذا كانت القارات لم تتحرك في الماضي ، فإن الحزوز الجليدية glacial striations في الباليوزوي المتناثر والمحفوفة في صخور الأساس في أستراليا والهند وأفريقيا وأمريكا الجنوبية تدل على أن حركة الجليد لكل قارة كانت من المحيطات إلى اليابسة في مناخ مغدري إلى شبه مغدري ، وهو احتمال بعيد الحدوث تماما .

ب- أما إذا أعيد تجميع القارات بحيث تقع جنوب أفريقيا في القطب الجنوبي ، فإن حركة جليد التلج للتكون في مناخ قطبي ، والمستدل عليها من الحزوز الجليدية ، تكون من منطقة مركزية سمكية فوق اليابسة إلى الخارج نحو حوافها .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).



شكل (4.17): مضاهاة أحزمة الجبال عبر شمال المحيط الأطلنطي.

أ. تمتد حاليا جبال الأبالاش على امتداد الشاطئ الشرقي لأمريكا الشمالية ، وتختفي فجأة عند شاطئ نيويورك ولان . ويلاحظ وجود جبال لها العمر والتركيب نفسها تقريبا في الجزر البريطانية واسكتلندا .

ب. وإذا أعيد وضع الكتل القارية في أوضاعها قبل عملية الانجراف فإن هذه السلاسل الجبلية القديمة ستكون حزاما مستمرا تقريبا . وقد تكون تلك السلاسل الجبلية المطوية قبل حوالي 300 مليون سنة تقريبا ، عندما اصطدمت الكتل القارية ببعضها أثناء تكون القارة العملاقة السيام باليانجيا .

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

داخل اليابسة (شكل 5.17) . ويدوا أن هذا التفسير بعيد الاحتمال ، حيث إن التاليج القارية الكبيرة تنساب من مناطق التجمع المركزية إلى الخارج ناحية البحر .

والبعيدة عن بعضها حاليا كانت تقع كلها في يوم ما على حزام مناهى واحد .

كما تقدم أيضا الحفريات الحيوانية دليلا قويا على الانجراف القارى . ويمثل جنس ميزوسورس *Mesosaurus* وهو من زواحف الماء العذب التى تتواجد حفرياتها في صخور العصر البرمى في مناطق محددة في البرازيل وجنوب أفريقيا فقط ولا يوجد في مناطق أخرى من العالم (شكل 6.17). ونظرا للاختلاف البين في فسيولوجية حيوانات المياه العذبة عن فسيولوجية حيوانات المياه المالحة ، فإنه من الصعب تخيل كيف يعوم زاحف ماء عذب عبر المحيط الأطلنطي ليجد بيئة ماء عذب أخرى مشابهة تقريبا لبيئته الأصلية . وعلاوة على ذلك ، وبافتراض أن الميزوسورس قد عبر المحيط الأطلنطي فإن بقاءه يجب أن تكون منتشرة في صخور قاع هذا المحيط . وحيث إن قاع المحيط الأطلنطي لا يتسوى على أى بقايا للميزوسورس ، فإنه من المنطقي افتراض أن الميزوسورس قد عاش في المناطق المتقابلة حاليا من قارتي أمريكا الجنوبية وأفريقيا ، وأن هاتين القارتين كانتا متحدين في قارة واحدة .

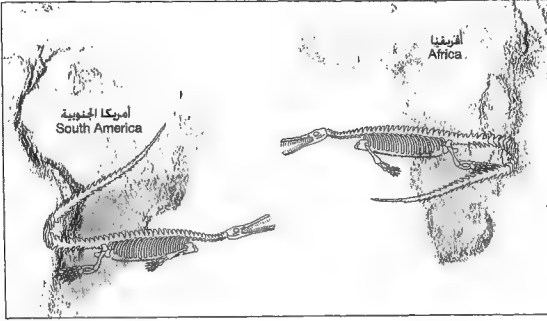
وعلى الرغم من أن الأدلة التى ساقها فاجنر ومؤيدوه لإثبات الانجراف القارى تبدو قوية ومقنعة ، إلا أن نقص الميكانيكية المناسبة لشرح حركة القارات وقفت حائلا أمام القبول الواسع لفكرة الانجراف القارى . واستمرت حالة عدم القبول هذه حتى أثبتت الأدلة الجديدة من دراسة المجال المغناطيسى للأرض وبحوث علوم البحار أن أحواض المحيطات حديثة العمر (أقل من 200 مليون سنة) ، مما أدى إلى عودة الاهتمام للانجراف القارى مرة ثانية .

فإذا لم تكن القارات قد تحركت في الماضي ، فإن ذلك يستوجب أن نفسر كيف تحركت المثالج من المحيطات إلى الأرض ، وكيف تكونت مثالج قارية على مساحات شاسعة بالقرب من خط الاستواء . ولكن إذا أعيد تجميع القارات في كتلة واحدة بحيث يكون جنوب أفريقيا عند القطب الجنوبي ، فإن اتجاه حركة المثالج القارية في حقب الحياة القديمة المتأخر يمكن تفسيرها . وعلاوة على ذلك فإن هذا الترتيب الجغرافى يضع القارات الشمالية في قارة واحدة هى قارة لوراسيا *Laurasia* بالقرب من المنطقة المدارية ، مما يفسر وجود الحفريات النباتية في الفحم .

جـ. أدلة من الحفريات

تأتى بعض الأدلة القوية على فرضية الانجراف القارى من السجل الحفرى . فتوجد حفريات من فلسورة جلوسوبتيريس *Glossopteris* النباتية في رواسب الفحم من عمر البنسلفاني (الكربونى المتأخر) والبرمى على قارات الجندوانا الخمس (شكل 3.17). وعلى الرغم من أن حبوب اللقاح والأبواغ *spores* تنتشر لمسافات واسعة بالرياح ، إلا أن نباتات الجلوسوبتيريس كانت تنتج حبوب لقاح كبيرة لدرجة يصعب نقلها بالرياح . وعلى فرض أن تلك الحبوب انتقلت عبر المحيطات ، فإنه من المحتمل ألا تبقى قادرة على الحياة والنمو في المياه المالحة لأى فترة زمنية .

وحيث إن المناخ الحالى للكتل القارية التى كانت تكوّن الجندوانا ، والتى تشمل أمريكا الجنوبية وأفريقيا والهند وإستراليا والقارة القطبية الجنوبية (أنتاركتيكا) ، يتنوع تنوعا شديدا ويتراوح بين المناخ المدارى في القارات الاستوائية إلى المناخ القطبى في القارة القطبية الجنوبية ، فقد اقترح فاجنر أن هذه القارات لابد أنها كانت ملتصمة ، بحيث إن تلك المناطق المنفصلة



شكل (6.17): وجدت حفريات الميزوسورس *Mesosaurus* فقط على كلا جانبي جنوب المحيط الأطلنطي وليس في أى مكان آخر من العالم. وتساعد بقايا هذه الحفريات وغيرها من الكائنات الحية الموجودة على قارتي أفريقيا وأمريكا الجنوبية على ربط هذه الكتل القارية ببعضها خلال حقبة الحياة القديمة المتأخر والحياة الوسطى المبكر.

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

د. المغناطيسية القديمة والتجوال القطبي

الصهارة فإن المعادن الحاوية للحديد ترتب نفسها في اتجاه المجال المغناطيسى للأرض ، عندما تصل تلك المعادن إلى نقطة كوري Curie point . ونقطة كوري هي الحرارة التي لا يستطيع المعدن الاحتفاظ بأية مغناطيسية دائمة فوقها . وهكذا يتم تسجيل كل من اتجاه وشدة المجال المغناطيسى للأرض . ويمكن استخدام تلك المعلومة في تحديد موقع قطبي الأرض المغناطيسيان وخط العرض الذي تواجد عنده الصخر أثناء تكوينه .

لقد أتت بعض أهم الأدلة المؤيدة للانجراف القارى من دراسة المغناطيسية القديمة للأرض . فقد درس بعض الجيولوجيين في أوائل الخمسينيات من القرن العشرين التغيرات التي حدثت في الماضي للمجال المغناطيسى للأرض ، من أجل الوصول لفهم أفضل للمجال المغناطيسى الحالى . وقد أدت تلك الدراسة ، وكما يحدث عادة في العلم ، إلى اكتشافات أخرى مهمة منها أن أحواض المحيطات هي معالم أرضية حديثة جيولوجيا ، وأن القارات قد تحركت فعلا في الماضي كما اقترح فاجنر والباحثون الآخرون .

وقد أظهرت الدراسات التي قام بها الجيوفيزيائي رنكورن S.K. Runcorn والعاملون معه أن موقع القطب المغناطيسى القديم والذي تُحد من المغناطيسية القديمة في طفوح الالابة ذات الأعمار المختلفة بأوروبا ، قد تغير كثيرا . فقد وجدوا أنه خلال 500 مليون سنة

وكما سبق أن أوضحنا فإن موقع القطبين المغناطيسيين للأرض يقابلان تقريبا موقع القطبين الجغرافيين للأرض (شكل 7.17) . وعندما تبرد

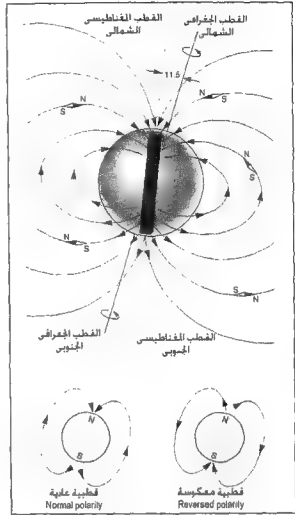
بقيت ثابتة في مكانها وأن القطب المغناطيسي الشمالي هو الذي تحرك ، والثانية : أن القطب المغناطيسي الشمالي كان ثابتا وأن قارة أوروبا هي التي تحركت ، أما الطريقة الثالثة فتفترض أن كلا من قارة أوروبا والقطب الشمالي المغناطيسي قد تحركا .



شكل (8.17): المسارات الظاهرية للتجوال القطبي polar wandering لكل من أمريكا الشمالية وأوروبا ، كما يظهر الموضع الظاهري للقطب الشمالي المغناطيسي في مختلف المصور على المسار الظاهري للتجوال القطبي لكل قارة .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

وعندما تم إسقاط قراءات المغناطيسية القديمة والتي قيست من طفوح لابة عديدة مختلفة الأعمار في شمال أمريكا على خريطة ، أشارت تلك القراءات إلى مواقع مختلفة للقطب المغناطيسي الشمالي ، تختلف عن تلك التي سجلتها طفوح من العمر نفسه في أوروبا (شكل 8.17). وعلاوة على ذلك فقد أشارت تحاليل طفوح اللابة من كل القارات إلى أن كل قارة لها سلسلة خاصة من الأقطاب المغناطيسية . هل يعني ذلك أن كل قارة لها قطب شمالي مختلف؟ يصعب قبول هذا التفسير



شكل (7.17): المجال المغناطيسي للأرض: رُسم المجال الداخِل للأرض كتضيق مغناطيسي كبير لتبسيط المجال الحقيقي للأرض ، الذي يكون أكثر تعقيدا من ذلك . ويشير اتجاه الشمال والجنوب في الشكلين الصغيرين إلى الشمال والجنوب الجغرافي . ويوضح الشكل اتجاه الخطوط المغناطيسية في القطبية العادية والمعكوسة .

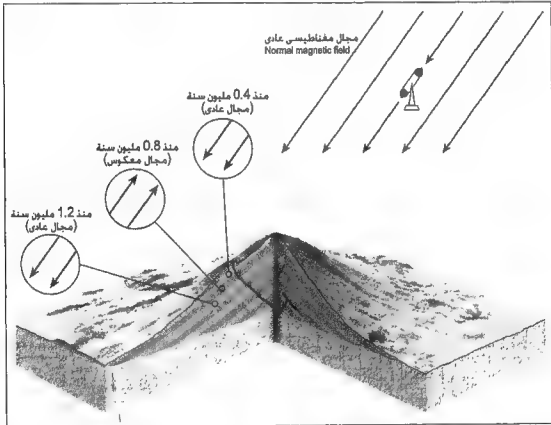
(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlson, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

مضت قد تحرك (تجولا ظاهريا) القطب الشمالي من المحيط الهادئ عبر شرق فشمال آسيا حتى وصل إلى موقعه الحالي ، بالقرب من القطب الشمالي الجغرافي للأرض (شكل 8.17). ويمكن تفسير هذا الدليل من المغناطيسية القديمة بثلاث طرق: الأولى أن قارة أوروبا

الانعكاسات المغناطيسية: تجمعت أدلة عديدة منذ أوائل الخمسينات من القرن العشرين لتثبت أن المجال المغناطيسى للأرض قد عكس قطبته ، أى اتجاهه ، دوريا في الماضي . ويعرف مثل هذا التغير في الاستقطاب من الاتجاه العادى إلى الاتجاه المعكوس بالانعكاس المغناطيسى **magnetic reversal** . وفي أثناء زمن القطبية العادية تترك الخطوط المغناطيسية الأرض بالقرب من القطب الجنوبي الجغرافى ، ثم تدخل إليها مرة أخرى بالقرب من القطب الشمالى الجغرافى (شكل 7.17) . ويعرف هذا الاتجاه بالقطبية العادية ، حيث إنه يائثل اتجاه القطبية الحالية . بينما تتحرك خطوط المغناطيسية في اتجاه عكسى أثناء القطبية

في ظل قوانين الفيزياء التى نعرفها عن كيفية نشأة المجال المغناطيسى للأرض .

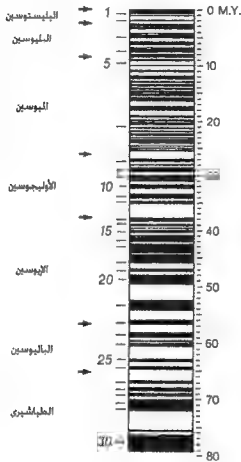
ولذلك فإن التفسير الأفضل لتجوال الأقطاب المغناطيسية **polar wandering** ظاهريا هو أنها بقيت في مواقعها الحالية بالقرب من الأقطاب الجغرافية ، وأن القارات هى التى تحركت . وعندما يتم تجميع القارات في كتلة واحدة ومطابقة القارات مع بعضها بحيث أن التسجيلات المغناطيسية القديمة تشير إلى قطب شمالى واحد ، فإننا نجد كما فعل فاجنر ، أن تتابعات الصخور وسلاسل الجبال والرواسب الجليدية تتماثل وتتناظر ، وأن الدليل الحفرى والمناخى يكون متفقا مع الجغرافية القديمة التى تم إعادة بنائها .



شكل (9.17): شكل توضيحي للمغناطيسية القديمة **paleomagnetism** المحفوظة في تدفقات من اللابة من أعمار مختلفة ، وقد استخدمت المعلومات التى أمكن الحصول عليها من مناطق مختلفة من أنحاء العالم لعمل مقياس زمنى **time scale** للمغناطيسية العادية **normal** والمعكوسة **reversed** والموضحة على شكل (10.17).

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

بينما يعتقد بعض الجيولوجيين أن الانعكاسات ربما تحدث نتيجة اصطدام كويكب أو مذنب بالأرض . ولهذا لا يوجد اتفاق حتى الآن بين الجيولوجيين على سبب هذه الانعكاسات المغناطيسية .



شكل (10.17): مقياس الزمن المغناطيسي للأرض time scale geomagnetic خلال الثمانين مليون سنة الأخيرة ، ويظهر زمن القطبية المغناطيسية العادية باللون الأسود ، بينما تظهر المغناطيسية المعكوسة باللون الأبيض .

(After Heirtzler, J.R., et al., 1968: Marine magnetic anomalies, geomagnetic field reversals and motions of the ocean floor and continents. Jour. Geophys. Res., V. 73).

IV. انتشار قيعان المحيطات

بالإضافة إلى أبحاث المغناطيسية القديمة في خمسينات القرن العشرين ، فقد أدى الاهتمام ببحوث علوم البحار إلى عمل خرائط شاملة لأحواض

المعكوسة reversed polarity ، حيث تترك الأرض بالقرب من القطب الشمالي ، ثم تدخلها مرة أخرى بالقرب من القطب الجنوبي (شكل 7.17) . وبمعنى آخر ، فإن القطبين المغناطيسيين الشمالي والجنوبي يتبادلان مواقعهما أثناء الانعكاس المغناطيسي . وكما سبق أن ذكرنا ، فإن عديدًا من الصخور يحتوى على سجل لشدة واتجاه المجال المغناطيسي للأرض أثناء تكون الصخور .

وتأتى معظم الأدلة على الانعكاسات المغناطيسية من طفوح اللابة على القارات . وتظهر دراسة المغناطيسية القديمة في تتابع من طفوح اللابة ، أن اتجاه المجال المغناطيسي بها كان عكس اتجاه المجال المغناطيسي الحالي للأرض (شكل 9.17) . ويعنى ذلك ، أن الأقطاب المغناطيسية للأرض قد عكست مواقعها ، أثناء الزمن الذى بردت فيه اللابة ، بمعنى أن إبرة البوصلة كانت تشير ناحية الجنوب بدلا من الشمال . ويوجد عديد من فترات المغناطيسية العادية والمعكوسة مسجلاً في طفوح اللابة ، وهى أحداث تُسجل على مستوى العالم . وحيث إنه يمكن تحديد عمر طفوح اللابة باستخدام النظائر المشعة ، فإنه يمكن تحديد عمر هذه الانعكاسات . ويوضح (شكل 10.17) زمن المغناطيسية العادية والمعكوسة خلال 80 مليون سنة الماضية . ويرجع عديد من الدراسات أن المجال المغناطيسي للأرض ينعكس كل نصف مليون سنة تقريبا .

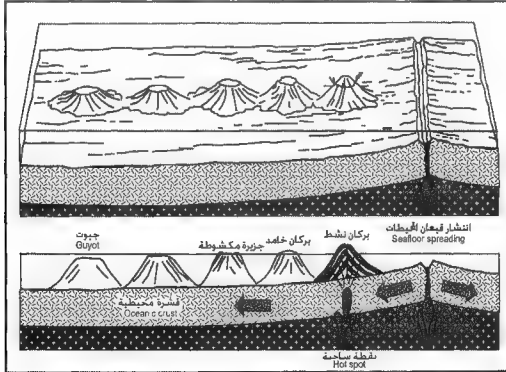
ولكن ما سبب الانعكاسات المغناطيسية ؟ . بالطبع فإن الإجابة عن هذا السؤال ليست سهلة ، حيث إنه لا يُعرف كيف نشأ المجال المغناطيسي للأرض . وتعضد الدراسات الحديثة فرضية أن المجال المغناطيسي للأرض قد نشأ من تيارات حمل في اللب الخارجى السائل للأرض ، وربما يحدث الانعكاس في المجال المغناطيسى حينما تغير تيارات الحمل اتجاهها .

منطقة ضيقة توجد مركزيا عند قمة تلك الحبيود وتعرف بنطاقات الخسف rift zones . كما توجد الانعكاسات المغناطيسية وكذلك عمر الرواسب البحرية العميقة الموجودة فوق القشرة المحيطية مباشرة في نمط يميز بالنسبة للحبيود المحيطية.

وقد كشف هارى هيس Harry Hess بحوثه في المحيط الهادى أثناء خدمته في الحرب العالمية الثانية ، حيث اكتشف الجيوتات guyots (جزر بركانية مسطحة القمة مغمورة تحت سطح البحر) والتي أمدت الجيولوجيين بدليل آخر على حركة قاع المحيط بعيداً عن حبيود وسط المحيط (شكل 11.17).

وقد نشر هيس اكتشافه للجيوت ونتائج دراساته الأخرى في بحث مهم عام 1962 م اقترح فيه فرضية انتشار قيعان المحيطات seafloor spreading كما

المحيطات في العالم. وقد أظهرت تلك الحرائط أن قيعان المحيطات تحتوى على أهم المرتفعات الجبلية على الأرض ، والتي تعرف بحبيود وسط المحيط ، وأن حبيود وسط الأطلنطي Mid-Atlantic Ridge هى جزء من نظام للحبيود منتشر على مستوى الكرة الأرضية ككل ، حيث يبلغ طوله أكثر من 65000 كم. ويتراوح عرض حبيود وسط المحيط بين 500 كم و 5000 كم ، حيث تشغل نصف مساحة قاع المحيط في بعض الأماكن . وتختلف حبيود قاع المحيط عن الجبال فوق القارات ، والتي تتكون من تتابع من الصخور الرسوبية المتحولة والمقطوعة بصدوع ، بينما تتكون الحبيود المحيطية من تتابع من طبقات البازلت التي تم رفعها وقطعها بالصدوع . كما ثبت أيضا أن الحبيود المحيطية تتميز بتيارات حرارية heat flow عال ونشاط زلزالي ونشاط بركاني بازلتي ، يقع على امتداد



شكل (11.17): سلسلة من الجزر البركانية تكونت عندما تحركت قشرة محيطية فوق نقطة ساخنة.

(After Strahler, A. and Strahler, A., 1999: Introducing Physical Geography, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

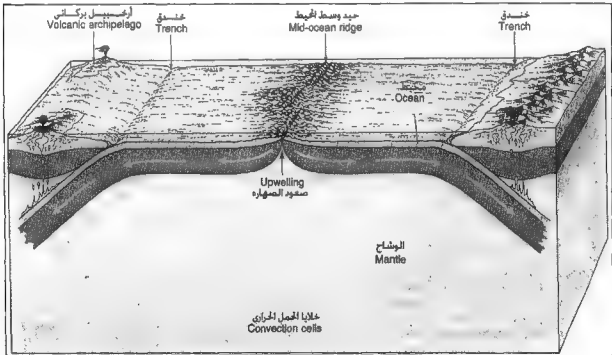
thermal convection خلال الوشاح، كيميائية تفسر تحرك الألواح. وتبعاً لما ذكره هيس، فإن الصهارة الساخنة تصعد من الوشاح وتتداخل على امتداد الكسور في نطاق الخسف rift zone حيث يتم تحديد الحيويد المحيطية وتكون قشرة محيطية جديدة، ثم تندس القشرة المحيطية الباردة في الوشاح عند الخنادق المحيطية العميقة حيث تسخن وتصعد مرة أخرى (شكل 12.17). وتحمل خلايا الحمل الحراري في الوشاح قاع المحيط إلى الخنادق المحيطية العميقة حيث يغوص قاع المحيط في الوشاح، بشكل مشابه لأحزمة نقل البضائع.

أ. الانمكاسات المغناطيسية والانجراف القاري

كيف يمكن إثبات فرضية هيس؟ فإذا كانت هناك قشرة محيطية جديدة تتكون عند الحيويد المحيطية

شرح فيه أيضاً التحرك القاري. وقد اقترح هيس أن القارات لا تتحرك عبر القشرة المحيطية أو خلالها، بل إن كلا من القارات والقشرة المحيطية يتحركان سوياً وأنها جزء من ألواح كبيرة. وطبقاً لفرضية هيس، فإن القشرة المحيطية تنفصل عند حيويد وسط المحيط حيث تتكون قشرة محيطية جديدة من الصهارة الصاعدة. وعندما تبرد الصهارة، فإن القشرة المحيطية المتكونة حديثاً تتحرك جانبياً بعيداً عن الحيويد. وهكذا يمكن شرح كيف أن الجزر البركانية المتكونة عند قمم الحيويد أو بالقرب منها أصبحت فيما بعد جيوتات (شكل 11.17).

وقد أحيا هيس الفكرة التي اقترحها أرثر هولمز وآخرون في الفترة 1930 - 1940 م عن نظام نقل الحرارة أو خلايا الحمل الحراري cells



شكل (12.17): انتشار قيعان المحيطات sea-floor spreading. تؤدي مادة الوشاح الصاعدة على امتداد حيويد وسط المحيط mid-ocean ridge إلى نشأة قشرة محيطية جديدة. وتحمل خلايا الحمل الحراري في الوشاح قاع المحيط بشكل مشابه لأحزمة نقل البضائع إلى الخنادق المحيطية العميقة، حيث يغوص قاع المحيط في الوشاح.

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

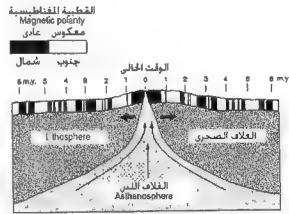
بعيداً عن الحيدود المحيطية ، فإن تداخلات الصهارة المتكررة سوف تكون مجموعات متناثلة من الشرائط المغناطيسية ، حيث تُسجل أوقات القطبية المغناطيسية العادية والمعكوسة (شكل 13.17). وقد تأيد ذلك بعد بوقت قصير فاين وماثيوس ومورلي بدليل من نتائج المغناطيسية التي قيسَت عبر حيدود ريكنيز Reykjanes Ridge ، وهو جزء من حيدود وسط الأطلنطي جنوب غرب جزيرة آيسلندة (شكل 14.17) ، حيث وجد العلماء أن الشاذات المغناطيسية في هذه المنطقة تكون شرائط موزعة موازية لبعضها البعض ومتناثلة على جانبي الحيدود المحيطي. وفي نهاية ستينيات القرن العشرين وجدت أنماط من الشاذات المغناطيسية محيطة بمعظم الحيدود المحيطية.

وقد تم المسح المغناطيسي لمعظم قيعان المحيطات تقريباً ، حيث توضح نتائج ذلك المسح أن أحدث جزء من القشرة المحيطية يكون مجاوراً لحيدود الانتشار ، وأن عمر القشرة المحيطية يزداد كما ابتعدنا عن محور الحيدود المحيطي ، كما هو متوقع من فرضية انتشار قيعان المحيطات . وعلاوة على ذلك ، فإن عمر أقدم الصخور المحيطية هو 180 مليون سنة ، بينما يبلغ عمر أقدم صخور القشرة القارية المنكشفة حوالي 3.96 بليون سنة. ويؤدي هذا الفرق إلى تأييد فكرة أن أحواض المحيطات هي ملامح حديثة جيولوجياً ، وأن فتح تلك المحيطات وغلقها مشمول عن حركة القارات .

ب - الحفر البحري العميق: إثبات لفرضية انتشار قيعان المحيطات

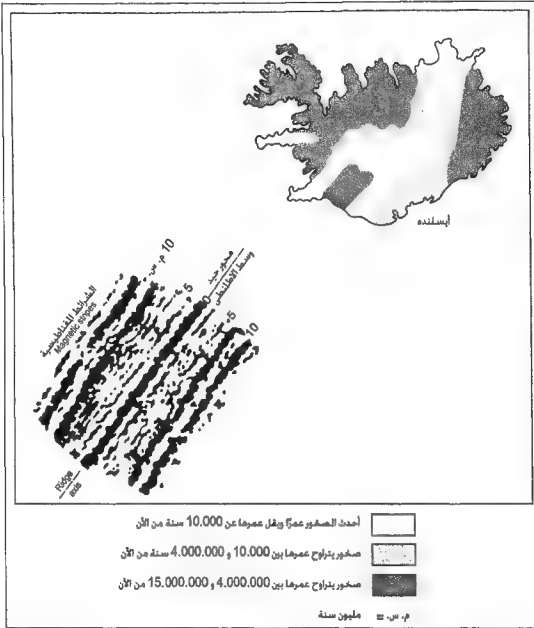
أكدت النتائج التي تم الحصول عليها من مشروع الحفر البحري العميق Deep-Sea Drilling Project التفسيرات التي سبق التوصل إليها من دراسات المغناطيسية القديمة . وقد قدمت أسطوانات الحفر من الرواسب البحرية العميقة وكذلك القطاعات الجانبية (بروفيل) الزلزالية التي تم الحصول عليها

باستمرار ، وأن المجال المغناطيسي يعكس نفسه دورياً ، فإن تلك الانعكاسات المغناطيسية تستجلب في صخور القشرة المحيطية كشاذات مغناطيسية . وقد أشارت النتائج المغناطيسية التي جمعها العلماء إلى وجود نمط غير عادي من شاذات مغناطيسية موجبة وسالبة على قاع المحيط الهادئ من ناحية الشاطئ الغربي لأمريكا الشمالية. وقد تكون هذا النمط من مجموعات من الشرائط في اتجاه شمال - جنوب تقريباً ، إلا أنها كانت مقطوعة ومزاحة بكسور أساسية تمتد في اتجاه شرق غرب . وقد فُسر ذلك النمط عام 1963 م عندما توصل الجيولوجيان البريطانيان فاين وماثيوس Vine and D. Matthews من جامعة كامبردج ومورلي W. Morley وهو جيولوجي كندي ، مستغلين عن بعضهم ، إلى نموذج لشرح هذا النمط من الشاذات المغناطيسية.



شكل 13.17: قطاع عرضي لقاع محيط موضعا عليه الشاذات المغناطيسية . وتوضح الأرقام الموجودة فوق قاع المحيط الأعمار مقدرة بملايين السنين . وشبه التنايل على جانبي حيد وسط المحيط شريط يسجل حركة حزامي نقل يضائع يتعدان عن حيد وسط المحيط . (After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston.

وقد اقترح هؤلاء العلماء الثلاثة أنه عندما تنشق الصهارة البازلتية على قمم الحيدود المحيطية ، فإنها تسجل القطبية المغناطيسية للأرض magnetic polarity في وقت تبردها. ونتيجة لتحرك قاع المحيط



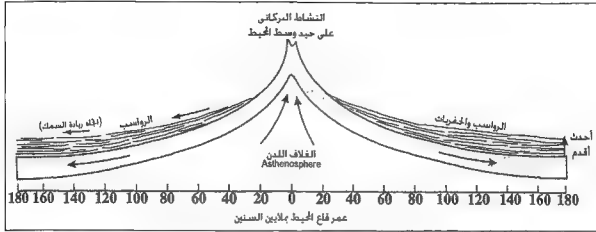
شكل (14.17): شدة المجال المغناطيسي مقاسة عند سطح المحيط الأطلسي جنوب غرب جزيرة أيسلندة، ويظهر فيها نسق مكون من شرائط متوازية وموازية لمحور حيد وسط المحيط الأطلسي. ويعد تماثل النسق وتماثل عمر الصخور البركانية على جانبي الحيد دلائل قوية على انتشار قاع المحيط بعيداً عن محور الحيد المحيطي.

(After Drake, C., 1970: "The geological revolution", Condon Lectures, Oregon State System of Higher Education, Eugene).

تلك الحيويد بسبب انتشار قيعان المحيطات حيث تستهلك عند نقاط الاندساس subduction zones. فإذا كان الأمر كذلك، فإن القشرة المحيطية يجب أن تكون أحدث عمراً عند الحيويد وتصبح أقدم عمراً كلما بعدنا عن تلك الحيويد. وعلاوة على ذلك،

بواسطة سفينة البحوث جلومار تشالنجر Glomar Challenger وسفن البحوث الأخرى العديد من النتائج التي تؤيد فرضية انتشار قيعان المحيطات.

فطبقاً لتلك الفرضية، فإن القشرة المحيطية تتكون باستمرار عند حيويد وسط المحيط وتتحرك بعيداً عن



شكل (15.17): قطاع عرضي في غلاف صخري عظمي عمودي على حيد وسط المحيط ، ويلاحظ أنه كلما ابتعدنا عن الحيد:

- (1) زادت أعمار الغلاف الصخري المقاسة بالطرق الإشعاعية .
- (2) زاد سمك الرواسب المتراكمة .
- (3) زاد عمر الحفريات في الرواسب .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

المحيطات . وبالتالي لا تجد الرواسب غير وقت قليل لكي تتراكم عند حيد الانتشار أو بالقرب منها حيث تكون القشرة المحيطية حديثة ، إلا أن السمك يزداد كلما بعدنا عن الحيد (شكل 15.17) .

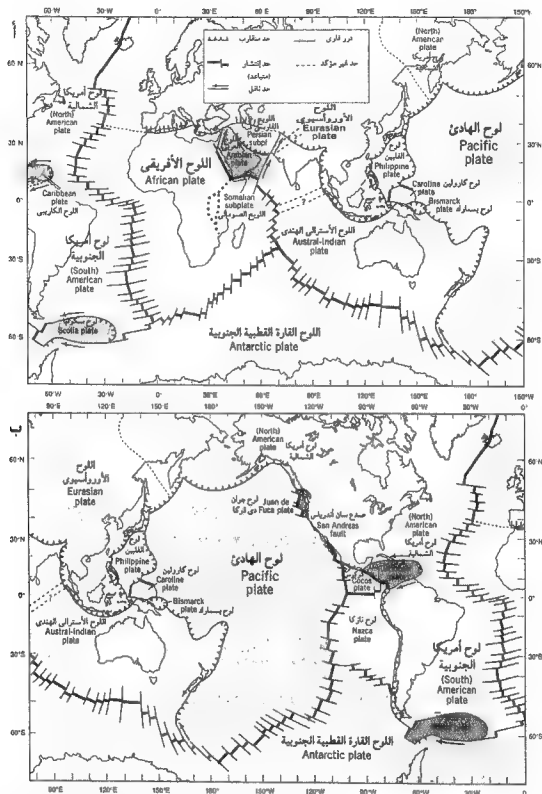
V. نظرية تكتونية الألواح

تقوم نظرية تكتونية الألواح **plate tectonic theory** على نموذج بسيط للارض يفترض أن الغلاف الصخري الصلب للأرض ، والذي يشمل كلا من القشرتين المحيطية والقارية بالإضافة إلى الجزء العلوي للوشاح والموجود أسفل القشرة الأرضية ، يتكون من عدد من القطع الصخرية المختلفة الحجم ، والتي تسمى **الوحدات plates** .

وتتكون ألواح الغلاف الصخري من سبعة ألواح كبيرة ، موضحة في جدول (1.17) . كما يمكن تمييز تسعة من الألواح الأصغر حجماً واللويحات والتي تتراوح في الحجم من متوسطة إلى صغيرة نسبياً . وبين (شكل 16.17) تلك الألواح وحدودها .

فإن صخور القشرة المحيطية على جانبي الحيد تكون متماثلة في العمر . وتؤكد نتائج المغناطيسية القديمة هذه الاستنتاجات (شكل 13.17) . وبالإضافة إلى ذلك ، فإن الرواسب الموجودة فوق القشرة المحيطية تحتوي على حفريات تؤكد هذا التوزيع المتوقع للأعمار (شكل 15.17) ، كما تؤكد أيضاً نتائج التاريخ بالطرق الإشعاعية لصخور الجزر المحيطية.

وتتراكم الرواسب في المحيطات المفتوحة بمعدل لا يقل عن 3م في المتوسط كل 1000 سنة . فإذا كانت أحواض المحيطات قديمة قدم القارات ، فإننا نتوقع أن يصل سمك الرواسب البحرية العميقة لعدة كيلومترات . ومع ذلك ، فإن النتائج التي حصلنا عليها من آبار الحفر المتعددة تشير إلى أن سمك الرواسب البحرية العميقة لا يزيد عن عدد من مئات الأمتار وتقل أو تختفي عند الحيد المحيطية . ولا يمثل اختفاء تلك الرواسب عند الحيد المحيطية أى مفاجأة ؛ لأن تلك المناطق هي التي تتكون فيها قشرة محيطية جديدة باستمرار نتيجة النشاط البركاني وانتشار قيعان



شكل (16.17). ألواح القشرة الأرضية في الوقت الحاضر . تتحرك ألواح الغلاف الصخري ببطء أنفياً بعيداً عن بعضها نحو ألواح أخرى ، تتفصل الألواح على امتداد حيود وسط المحيط mid-ocean ridges ، وتتقارب عند نطاقات الانسلاخ subduction zones وتنزلق بالنسبة لبعضها البعض على امتداد صدوع مضربية الانزلاق strike-slip faults .

(After Strahler, A. and Strahler, A., 1999: Introducing Physical Geography, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

جدول (1.17) ألواح الغلاف الصخرى

اللويحات		الألواح الأصغر حجماً	الألواح الكبيرة
Persian	الفارسي	Nazca	نازكا
Somalian	الصومالي	Cocos	كوكوس
		Philippine	الفيلين
		Caribbean	الكاريبي
		Arabian	العربي
			جوان دي فوكا
		Juan de Fuca	
		Caroline	كارولين
		Bismark	بسمارك
		Scotia	سكوتيا
			Pacific
			المهادئ
			North American
			الأمريكي الشمالى
			South American
			الأمريكي الجنوبى
			Eurasian
			الأوروآسيوى
			African
			الأفريقى
			Australian- Indian
			الاسترالى - الهندى
			Antarctica
			القارة القطبية الجنوبية (أنتاركتيكا)

القارى معظم اللوح الأوروآسيوى ، بينما يحد الحافة الغربية والشمالية حزام من غلاف صخرى عيطى. ويوجد فى وسط اللوح الأفريقى غلاف صخرى قارى ، يكون قارة أفريقيا ، يحيط به تقريباً غلاف صخرى محيطى.

ويأخذ اللوح الاسترالى - الهندى شكل مستطيل طويل ، ويكون معظمه عبارة عن غلاف صخرى محيطى يضم لبين من الغلاف الصخرى القارى ، هما : قارة أستراليا وشبه القارة الهندية . وتدل بعض الدراسات الحديثة أن تلك القارتين تتحركان مستقلتين عن بعضهما ، ويمكن اعتبارهما فعلياً أجزاء من ألواح مستقلة. ويأخذ لوح القارة القطبية الجنوبية (أنتاركتيكا) شكلاً بيضاوياً تقريباً حيث تكون معظم حوافه عبارة عن حدود انتشار ، مما يعنى أن الألواح الأخرى تتحرك بعيداً عن القطب الجنوبى. وتكون قارة القطب الجنوبى (أنتاركتيكا) لباً من غلاف صخرى قارى ، يحيط به تماماً غلاف صخرى محيطى.

ويشغل لوح المحيط الهادئ الكبير معظم المحيط الهادئ ويتكون كله تقريباً من غلاف صخرى محيطى باستثناء جزء صغير من غلاف صخرى قارى يشمل جنوب غرب كاليفورنيا وشبه جزيرة باها بكاليفورنيا. ويتحرك لوح المحيط الهادئ فى اتجاه الشمال غرب . ولذلك ، يحد هذا اللوح نطاقات اندساس على امتداد معظم حدوده الغربية والشمالية ، بينما تكون معظم حدوده الشرقية والجنوبية حدود انتشار. ونلاحظ من شكل (16.17) أن باقى الألواح الكبيرة تشمل جزءاً من قشرة محيطية وجزءاً من قشرة قارية.

ويشمل اللوحان الأمريكى الشمالى والأمريكى الجنوبى معظم الغلاف الصخرى القارى لأمريكا الشمالية والجنوبية بالإضافة إلى الغلاف الصخرى المحيطى الواقع غرب حيد وسط الأطلنطى . ومعظم الحد الغربى للوحين الأمريكيتين الشمالى والجنوبى هو حد اندساس حيث تهبط القشرة المحيطية تحت الغلاف الصخرى القارى ، بينما يكون الحد الشرقى لهذين اللوحين هو حد انتشار . ويشغل الغلاف الصخرى

اللدن تنشأ بسبب وجود نظام انتقال حرارى يشمل تياراً صاعداً للمواد الساخنة والتيار المستعرض وتياراً هابطاً للمواد الباردة . وعندما تتحرك الألواح فوق الغلاف اللدن ، فإنها تنفصل غالباً عند الحيوود المحيطية ، بينما تصطدم وتندس في مناطق أخرى مثل الخنادق المحيطية، حيث تعود مرة أخرى إلى الوشاح شكل (12.17).

وتلقى نظرية تكتونية الألواح حالياً قبولا واسعا من معظم الجيولوجيين ، بسبب الأدلة المتعددة التى تتمتع عليها ، كما أنها نظرية شاملة تفسر عديداً من الملامح والأحداث الجيولوجية والتي يبدو أنها غير مرتبطة ظاهرياً . ويفسر الجيولوجيون الآن عديداً من العمليات الجيولوجية ، مثل بناء الجبال والنشاط الزلزالي والنشاط البركاني في ضوء نظرية تكتونية الألواح.

أ. حدود الألواح

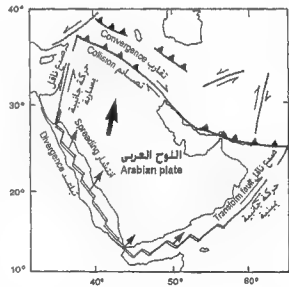
تتحرك الألواح بالنسبة لبعضها البعض ، بحيث يمكن التمييز بين ثلاثة أنواع من حدود الألواح وهى الحدود المتباعدة والمتقاربة والناقلة (شكل 18.17) . وبسبب تفاعل الألواح مع بعضها عند حدودها معظم النشاط الزلزالي والنشاط البركاني على الأرض وكذلك عمليات بناء الجبال (جدول 2.17) .

١- الحدود المتباعدة

توجد حدود الألواح المتباعدة **divergent plate boundaries** ، والتي تعرف أيضاً بمراكز الانتشار **spreading centers** ، عندما تنفصل الألواح عن بعضها ويتكون غلاف صخري محيطى جديد ، على امتداد محور حيود وسط المحيط **mid-oceanic ridges** . وتتميز الحيوود المحيطية بطوبوغرافية وعرة

ويوضح شكل (17.17) حدود اللوح العربى الذى يتكون كلية من غلاف صخري قارى . وعلى الرغم من أن البحر الأحمر وخليج عدن لا يحدث عليها زلازل كبيرة ، إلا أن وجودهما (كنشأة لمحيطيات فى المستقبل) هو المسئول عن دفع اللوح العربى إلى اللوح الأوراسيوى ، مما تسبب في نشأة عديد من الزلازل المدمرة هناك . وقد أدى هذا التصادم إلى نشأة جبال زاغروس وطوروس ، وتكوّن عديد من الصدوع وحدوث زلازل مدمرة مميزة لهذا الجزء من العالم .

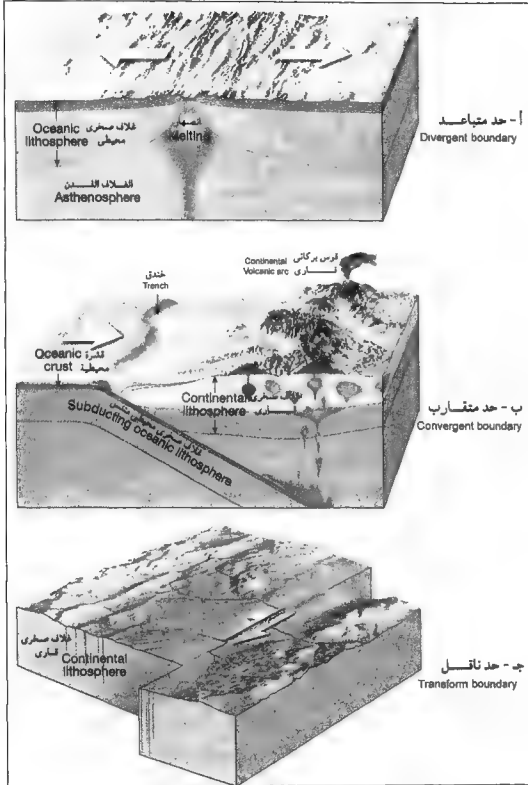
كما يختلف سمك الألواح ، حيث يصل سمك الألواح المتكونة من الوشاح العلوى الصلب والقشرة القارية إلى حوالي 200 كم ، بينما يصل سمك الألواح المتكونة من الوشاح العلوى الصلب والقشرة المحيطية إلى حوالي 100 كم .



شكل (17.17): اللوح العربى والذى يتكون كلية من غلاف صخري قارى . وقد أدى تصادم اللوح العربى باللوح الأوراسيوى إلى نشأة جبال زاغروس وجبال القوقاز.

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters, 2nd edition, WCB/McGraw Hill, Boston).

ويوجد الغلاف اللدن (الأستينوسفير) أسفل الغلاف الصخري ، والذى يكون أكثر سخونة وضعفاً . ويعتقد أن حركة الألواح التى تعلو الغلاف

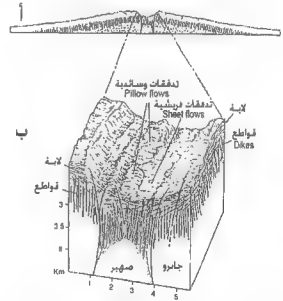
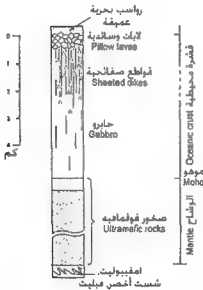


شكل (18.17): حدود الألواح المختلفة

أ. حد متباعد ب. حد متقارب ج. حد ناقل .

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition, Macmillan Publishing Company, New York).

ومتجعدة وتضاريس مرتفعة على امتداد كسور كبيرة (صدوع عادية) مع هبوط قاع الوادي المتمد على قمة الحيوود ونشاط زلزالي وسريان حرارى $heat flow$ عالٍ وانسيابات بازلتية أو لابة وسائدية . ويوضح شكل (19.17) قطاعا مستعرضا لحيود وسط المحيط ، مع تكبير يوضح تلك التجمعات الصخرية الممتدة مركزيا عند قمة تلك الحيوود . وجدير بالملاحظة أن انبثاق اللابة وتدفقها من قمة الحيوود المحيطية ، وعلى امتداد مراكز الانتشار لا يكون مستمرا ، وإنما يتدفق بشكل متقطع مع تغير موقع المحور البركاني مع مضي الزمن . ويؤدى انبثاق اللابة إلى تكون قشرة محيطية ، كما تؤدي الانبثاقات المتتالية إلى تكون حيوود وسط المحيط.



شكل (19.17): حيوود وسط المحيط mid-ocean ridge

أ) قطاع مستعرض لحيود وسط المحيط

ب) تكبير يوضح تفاصيل وادي خسف rift valley عند قمة حيوود وسط المحيط . والتي تتميز بطوبوغرافية وعرة متجعدة وتضاريس مرتفعة ، مع هبوط قاع الوادي المتمد على قمة الحيوود وانسيابات بازلتية وتدفقات من اللابة الوسائدية .

شكل (20.17): قطاع نموذجي لتتابع أوفيوليت ophiolite . ويدل تجمع الرواسب البحرية العميقة واللايات الوسائدية والقواطع الصفائحية البازلتية ومتداخلات صخور الجابرو على نشأة هذا التتابع في بحر عميق . والأوفيوليتات هي قطع من القشرة المحيطية دفعت إلى حافة قارة نتيجة تصادم الألواح .

(After Moores and Vine, 1971; Vine and Moores, 1972; Hopsom, et al., 1981, In: Raymond, L.A., 1995: Petrology: The study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic rocks. Wm.C. Brown Publishers).

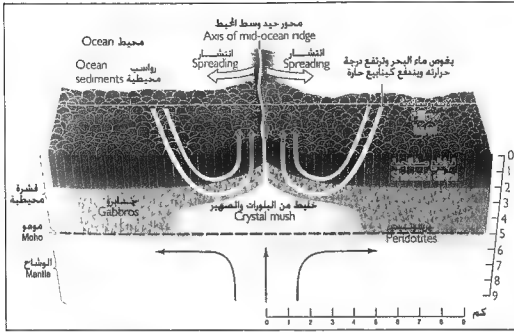
(After Hekinian, Moore and Bryan, 1976; Ballard and van Andel, 1977; Ballard, van Andel and Holcomb, 1982, In: Raymond, L.A., 1995: Petrology: The study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic rocks. Wm.C. Brown Publishers).

جدول 17 - 2: الأنواع المختلفة لحدود الألواح والخصائص المميزة لكل منها

نوع القشرة على كل لوح	الخصائص	نوع الحد	
		متقارب Convergent	متباعد Divergent
محيطي - محيطي	الطوبوغرافية الزلازل النشاط البركاني	تحتق عيطي يتراوح عمق البور بين 0 و 700 كم تتكون البراكين الأنديزيتية في أقواس جزر موازية للحدائق خندق تونجا- كرماديك وخندق الأليوشن	حيد عيطي مع وادي خسف كل البور تقع على عمق أقل من 100 كم حم وساندية بازلتية حيد وسط الأطلنطي
محيطي - قاري	الطوبوغرافية الزلازل النشاط البركاني	خندق عيطي بور الزلازل على عمق من 0 إلى 700 كم البراكين الأنديزيتية مع القليل من الداسيت والريوليت في أحزمة جبال موازية للحدائق الشاطئ الغربي لأمريكا الجنوبية	----- ----- ----- لا توجد أمثلة
قاري - قاري	الطوبوغرافية الزلازل النشاط البركاني	حزام جبال حديث البور على عمق حوالي 300 كم وتنتشر على منطقة واسعة لا يوجد نشاط بركاني، تحول شديد وتداخل من بلوتونات جرانيتية المهايالا والألب وازجروس	وادي خسف كل بور الزلازل على عمق أقل من 100 كم براكين من البازلت والريوليت وادي الخسف الأفريقي والبحر الأحمر

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وتعتبر عملية نشأة قيعان المحيطات غير مفهومة
تماما حتى الآن ، ولكن من المعروف أنها تشتمل على
نشاط صهاري ودوران لماء البحر ونشاط تكتوني .
ويمثل شكل 21.17 صورة تخطيطية مبسطة جداً لما
يحدث . وقد أظهرت جانبيات (بروفيلات) الموجات
الصوتية عديداً من غرف (أو عدمات) الصهارة



شكل (21.17): رسم مبسط لبيان كيف تتكون القشرة المحيطية عند حيد وسط المحيط. ويرتفع من الوشاح خليط من البلورات والصهير عند حيد وسط المحيط، ويتجمع ليملاً غرفة صهارة magma chamber ضخمة رقيقة عدسية الشكل تندفع منها قواطع من الصهارة تكوّن لابة وسائبة عند قاع البحر ويسفلها قواطع صفائحية، ويرد خليط البلورات والصهير ويتكون الجابرو. كما يوضح الشكل طريقة نشأة المحاليل hydrothermal solutions. الحرماية.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New

والصغيرة مثل تلك الموضحة في شكل (21.17). حيث يصعد الوشاح الساخن نتيجة انفصال الألواح ويبدأ في الانصهار. وعندما تصل مادة الوشاح إلى أعماق ضحلة، فإنها تصبح مكونة من خليط من حوالي 85% بلورات و15% من صهير بازلتى. ويملأ هذا الصهير غرفة صهارة ضخمة رقيقة عدسية الشكل، يندفع منها فرش من القواطع. وتداخل تلك القواطع المتكونة حديثاً داخل قواطع سبق انبثاقها لتكون تركيب يتكون من مجموعة من القواطع الرأسية المتوازية تقريباً والمتراصة وتشبه مجموعة كتب متوازية موضوعة رأسياً. ويعرف هذا التركيب باسم القواطع الصفائحية sheeted dykes (شكل 22.17). ويتصلب البازلت المتدفق فوق سطح المحيط ليكون لابات

وسائدية (شكل 4.5)، وهى اللابات المميزة للنشاط البركاني تحت الماء. وتكون اللابات البازلتية غطاءً فوق القواطع الصفائحية. وعندما يتصلب الخليط الموجود في غرف الصهارة فإنه يكوّن صخر الجابرو (المقابل الجوفى لصخور البازلت) الذى يكوّن طبقة أسفل القواطع الصفائحية. وتتكون طبقة رقيقة من الرواسب البحرية العميقة تغطى القشرة المحيطية المتكونة حديثاً.

وعندما ينتشر قاع المحيط، فإن طبقات الرواسب واللابات والقواطع والجابرو تنقل بعيداً عن حيد وسط المحيط حيث يتجمع هذا التسارع المميز من الصخور، والذى يكوّن القشرة المحيطية.



شكل (22.17): قواطع صفائح شطبة sheeted dykes ، وادي غدير - الصحراء الشرقية - مصر (أ.د. ممدوح عبد الفتاح حسن ، هيئة المواد النووية - مصر).

الجزيرة العربية (شكل 12.18) وخليج كاليفورنيا الذي يفصل باها كاليفورنيا Baja California عن أرض المكسيك ، أمثلة جيدة لهذه المرحلة الأكثر تقدماً من عملية الحسف. وفي النهاية ، فإن نطاق الحسف يبقى مكاناً لاستمرار النشاط الناري ، وتنشأ باستمرار قشرة محيطية جديدة لحوض محيطي مستمر في التمدد .

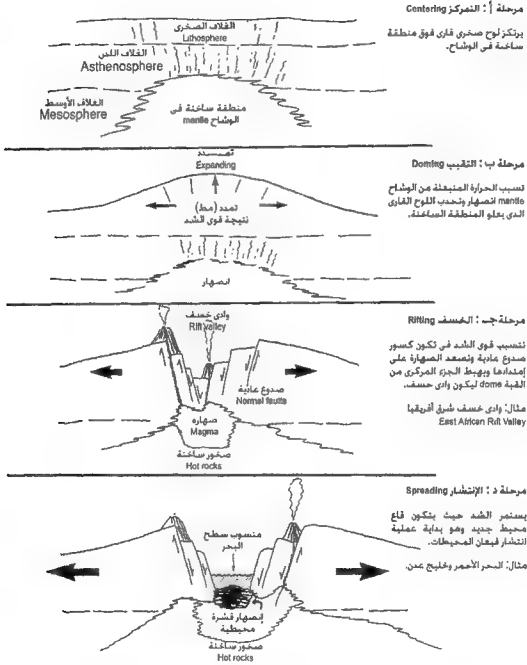
2- الحدود المتقاربة

ليتكون غلاف صخري جديد باستمرار على امتداد حدود الألواح المتباعدة ، فإن الغلاف الصخري الأقدم يجب أن يستهلك ويعاد تدويره لكى تبقى المساحة الكلية لسطح الأرض ثابتة ، وإلا فإن الكرة الأرضية ستتمدد باستمرار. ويحدث هذا الاستهلاك للألواح عند حدود الألواح المتقاربة **convergent plate boundaries** حيث يقترب أو يتصادم لوحان.

وعندما يتصادم لوحان ، فإن الحافة المقدمة لأحد اللوحين تهبط عند الحد المتقارب تحت حافة اللوح

وتتواجد أيضاً الحدود المتباعدة تحت القارات خلال المراحل الأولى لتكسر القارات (شكل 23.17 أ ، ب) . وعندما تصعد الصهارة تحت قارة ، فإن القشرة الأرضية ترتفع أولاً وتمتد ويقبل سمكها نتيجة التحدب ، حيث تتكون كسور ووديان خسف **rift valleys** (شكل 23.17 جـ). وخلال هذه المرحلة ، تتداخل الصهارة في الصدوع والكسور لتكون جدران موازية **sills** وقواطع **dikes** وانسيابات من اللابة. وتغطي انسيابات اللابة في معظم الأحيان قيعان وديان الحسف (23.17 جـ) . وتقدم وديان خسف شرق أفريقيا مثالاً عموماً لهذه المرحلة من تكسر القارات .

وعندما تستمر عملية الانتشار ، فإن بعض وديان الحسف تستمر في الاستطالة والتعمق حتى تكون بحراً ضيقاً ، ممتداً طويلاً لفصل بين الكتلتين القاريتين (شكل 23.17 د) . ويمثل البحر الأحمر ، الذى يفصل شبه الجزيرة العربية عن أفريقيا وكذلك خليج عدن جنوب



شكل (23.17): مراحل تكون حوض محيط نتيجة تكسر القارات .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

الآخر نتيجة عملية الاندساس subduction . ويجدد المستوى المائل للبور الزلزالية والمعروف بنطاق وبتراوح زاوية المبوط بين 35° درجة و 90° درجة بينى أوف Benioff zone (شكل 15.16) نطاق الاندساس . وبينما يتحرك اللوح المندرس إلى أسفل في تقريباً من السطح وتتكون خنادق محيطية عميقة .

المنطلق في صخور البريدوتيت ، وهى المكون الرئيسى لوتد الوشاح الموجود فوق اللوح المندس وتحت اللوح العلوى الراكب، حيث يسبب انصهارها (شكل 25.17). وقد أوضحت التجارب العملية كما سبق أن ذكرنا، أن إضافة كميات صغيرة من الماء تتسبب في خفض درجة الحرارة التى تنصهر عندها صخور الوشاح بعدد من مئات الدرجات.

وتتعدد مواد الوشاح الساخن الأقل كثافة وتستمر عملية الانصهار عندما ينخفض الضغط. ويكون الخليط الناتج من انصهار اللوح والصهير الناتج من الوشاح البريدوتيتى صهارة فوققافية . ولقد تم التعرف في تلك الصهارة على عناصر شحيحة مميزة للقشرة المحيطية والرواسب ، مما يدل على مساهمة الصهير الناتج من انصهار اللوح الهابط في الصهارة .

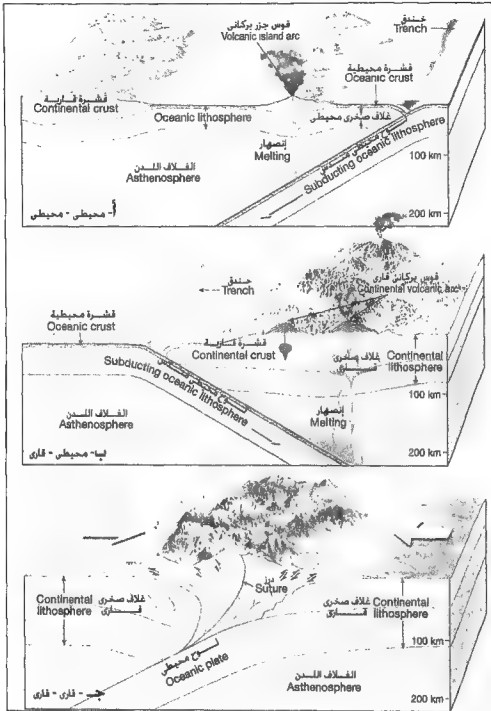
وتتراكم معظم الصهارة الفوققافية عند قاعدة قشرة اللوح الراكب، حيث يتداخل بعضها في القشرة. ويحدث التبلور التجزئى fractional crystallization حينما تنفصل الصهارة أثناء تبردها إلى مكونات مختلفة ، بسبب التكون والعزل المتواليين للبلورات عند درجات حرارة متتابعة الانخفاض . كما قد تتلصق الصهارة بعض صخور القشرة وتضمها خلال عملية التمثيل assimilation process . وبهذه الطريقة فإن الصهارة الفوققافية تكون صهارات ولايات مافية وأخرى أكثر سيليكية ، مثل البازلت والأنديزيت (ونادرا الداسيت). وتكون كثافة تلك الصهارة أقل من صخور الوشاح المحيطية وتتعدد إلى سطح الأرض خلال اللوح العلوى الراكب overriding plate ، حيث تتكون سلسلة منحنية (مقوسة) من البراكين تسمى قوس جزر بركانى volcanic island arc (لاحظ أن أى مستوى يقطع جسم كروى يكون قوسا) . ويوازى هذا القوس

الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) ، ترتفع درجة حرارته وينصهر في الوشاح في النهاية . وتعرف المنطقة المقوسة للنشاط الصهارى باسم قوس صهارى magmatic arc ، حيث يمتد هذا القوس موازيا للخنق المحيطى وتتعدد الصهارة إلى السطح لتكون سلسلة من البراكين. فإذا تكونت البراكين على قشرة محيطية ، فإن القوس الصهارى يعرف في تلك الحالة بقوس جزر بركانى volcanic island arc . أما إذا تكونت على القشرة القارية ، فإن القوس الصهارى يسمى قوسا بركانيا قاريا continental volcanic arc . ولا يحدث الاندساس عندما يكون كل من اللوحين المتقاربين قاريين ، بسبب أن كثافة القشرة الأرضية ليست عالية بدرجة كافية لتندس في الوشاح .

وتتميز حواف الألواح المتقاربة بالتشوه والنشاط البركانى وبناء الجبال والتحول والنشاط الزلزالى وتكون رواسب معدنية مهمة. ويمكن تمييز ثلاثة أنواع من حدود الألواح المتقاربة وهى: محيطى - محيطى ، ومحيطى - قارى ، وقارى - قارى .

الحدود المحيطية - المحيطية: عندما يتقارب لوحان محيطيان ، يندس أحدهما تحت الآخر على امتداد حد لوح محيطى - محيطى oceanic-oceanic plate boundary (شكل 24.17)، ويهبط اللوح المندس لأسفل ليكون الجدار الخارجى للخنق المحيطى . ويتواجد على امتداد الجدار الداخلى للوح المندس أجزاء من رواسب بحرية وتدية الشكل مطوية ومتصدعة بدرجة كبيرة ، بالإضافة إلى غلاف صخرى محيطى تم انتزاعه (كشطه) من اللوح الهابط . وعندما يهبط اللوح المندس في الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) فإنه يستخن وينصهر جزئيا .

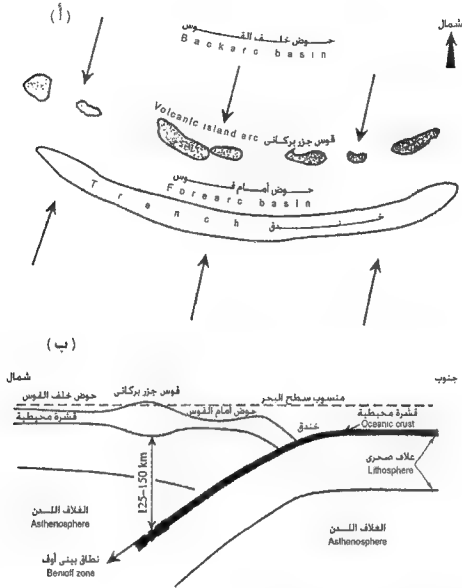
وينصهر بعض البازلت ومعه الرواسب في اللوح ، حيث ينطلق الماء وبعض المواد الأخرى. ويؤثر الماء



شكل (24.17): الحدود للتقارب

- (أ) محيطي - محيطي: عندما يتقارب لوحان محيطيان ينس أحدهما تحت الآخر ، ويبسط اللوح اللدن (الأسستوسفير) ليسخن وينصهر جزئياً ، وتصدد الصهارة إلى سطح الأرض خلال اللوح العلوي الراكب لتكوّن سلسلة من البراكين تسمى قوس جزر بركاني.
- (ب) محيطي - قاري: عندما يتقارب لوحان أحدهما محيطي والآخر قاري يبسط اللوح المحيطي الأكثر كثافة وينس تحت اللوح القاري في الغلاف اللدن ليسخن وتكون صهارة تصعد على هيئة سلسلة من البراكين تكون قوساً بركانياً قارياً أو تتدخل الصهارة في الأعماق على هيئة بلوتونات .
- (ج) قاري - قاري: عندما يتقارب لوحان قاريان لا ينس أحدهما تحت الآخر ولكن يحدث تصادم ، ويتكون نطاق عريض ، يتميز بالنشوء الشديد عند حد التصادم .

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).



شكل (25.17): أقواس الجزر البركانية volcanic island arcs

- أ. خريطة توضح قوس جزر بركانية ، وتشير الأسهم إلى اتجاه تقارب اللوحين
- ب. قطاع عرضي في قوس جزر يمتد من الشمال إلى الجنوب ، يوضح الحوض أمام القوس forearc basin والحوض خلف القوس backarc basin .

ممتلئ بالرواسب المستمدة من القوس البركاني ، بالإضافة إلى وتد متزايد accretionary wedge من الرواسب المحيطية والقشرة المحيطية التي كسحت من اللوح الهابط. وتمثل جزيرة سومطرة في إندونيسيا جزءا من قوس صهارى يتاخه حوض أمام قوس . ويوجد خلف القوس البركاني حوض خلف القوس

تقريبا الخندق المحيطي ويكون مفصولا عنه بمسافة قد تصل إلى عدة مئات من الكيلومترات ، حيث تعتمد تلك المسافة على زاوية ميل اللوح الهابط . وتوجد منطقة بين قوس الجزر والخندق المحيطي تسمى أمام القوس (شكل 25.17) ، وتشمل تلك المنطقة حوض أمام القوس forearc basin ، وهو نطاق منخفض

الموجودة في أقواس الجزر ؛ لأن الصهارة المتكونة في الوشاح ربما تهمس وتبتلع القشرة القارية المنصهرة أثناء عملية التمثيل . وتوجد في تلك الأحزمة الصهارية صخور متحولة ، تنشأ نتيجة إعادة التبلور تحت درجات الحرارة المرتفعة والضغط المنخفضة . وتحدث هذه الظروف لأن السوائل الساخنة تصعد بالقرب من السطح ، حيث تسبب ارتفاع درجات حرارة هذه البيشة المنخفضة الضغط .

وتمتد أقواس الجزر موازية للخنادق المحيطية ، وعلى مسافة يمكن مقارنتها بزاوية ميل اللوح الهابط المندس . فتكون الأقواس البركانية أبعد عن الخندق عندما تكون نطاقات الاندساس قليلة الميل ، بينما تكون الأقواس البركانية أقرب من الخندق نتيجة اندساس اللوح بميل حاد .

ويمثل شاطئ المحيط الهادى لأمريكا الجنوبية مثالا مميزا لحد لوح محيطي - قاري ، حيث يندس لوح نازكا المحيطي تحت لوح أمريكا الجنوبية . كما تقدم سلسلة جبال البحر الأحمر بمصر مثالا لاندساس لوح محيطي تحت لوح آخر قاري في زمن ما قبل الكامبري ليكون تلك السلسلة من الجبال الممتدة موازية للبحر الأحمر بمصر (شكل 26.17) .

الحدود القارية - القارية: عندما يتقارب لوحان قاريان على امتداد حد لوح قاري - قاري **continental plate boundary** ، فإن أحد اللوحين قد يزلق جزئيا تحت الآخر ، ولكن لا يندس أى من اللوحين بسبب كثافتها المنخفضة وتساويهما في السمك الكبير وبقايا طافيان (شكل 24.17 ج) . وقبل أن يحدث التصادم القاري ، فإن القارات تكون في أول الأمر مفصولة عن بعضها البعض بواسطة قشرة محيطية تندس تحت إحدى القارتين .

backarc basin له قاع يتكون من قشرة محيطية بازلتية . ويمثل بحر اليابان بين قارة آسيا وجزر اليابان مثالا جيدا لحوض خلف القوس مصاحب لحد لوح محيطي - محيطي .

وتتواجد معظم أقواس الجزر البركانية في الوقت الحالى في حوض المحيط الهادى وتشمل جزر أليوشن **Aleutian Islands** وقوس كرماديك - **Kermadec Tonga arc** وجزر اليابان والفلبين . بينما تتواجد أقواس جزر سكوتيا والأنتيل (كاريبى) **Scotia and Antillean island arcs** في حوض المحيط الأطلنطي .

الحدود المحيطية - القارية: عندما يتقارب لوحان أحدهما محيطي والآخر قاري ، فإن اللوح المحيطي الأكثر كثافة يندس تحت اللوح القاري على امتداد حد لوح محيطي - قاري **oceanic-continental plate boundary** (شكل 24.17 ب) . ويكون اللوح المحيطي الهابط الجدار الخارجى للخندق المحيطي ، كما هو الحال في الحدود المحيطية - المحيطية .

وعندما يهبط اللوح المحيطي البارد ، والمحتوى على الماء ، والأعلى في الكثافة في الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) الساخن ، فإنه يحدث انصهار وتكون صهارة . وتصعد تلك الصهارة تحت اللوح القاري العلوى الرأكب ، لتطفح عند السطح لتكون سلسلة من البراكين الأنديزيتية (مع القليل من الداسيت والريوليت) تعرف بالقوس البركاني القاري **continental volcanic arc** ، أو تتداخل في العمق في الحافة القارية على هيئة بلوتونات **plutons** (خاصة الباثوليثات) .

وتكون تجمعات الصخور النارية في الأقواس البركانية القارية أكثر سيليكية (فلسية) من تلك

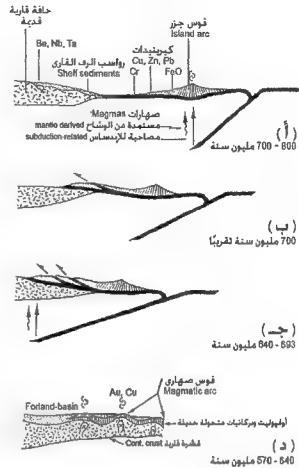
بالتشوه الشديد عند حد التصادم ، حيث تطحن القارتان كلا منهما الأخرى . ويتميز هذا الحد بوجود حزام من الجبال مقطوع بعدد من صدوع الدسر thrust faults وزيادة سمك القشرة القارية بدرجة كبيرة في نطاق الاصطدام .

وقتل جبال الهيمالايا مثالا لتصادم القارات الذى بدأ منذ 40-50 مليون سنة ، حيث اصطدم لوح الهند مع اللوح الأوروآسيوى . وما زالت عملية رفع الصخور مستمرة مع التصدع وعديد من الزلازل الكبيرة المستمرة حتى الآن ، مثل زلزال باكستان الذى حدث يوم السبت 8 أكتوبر 2005 م وبلغت قوته 7.6 على مقياس ريختر وراح ضحيته ما يقرب من أربعة وسبعين ألف قتيل وحوالى مائتى ألف جريح ، كما شرد ما يقرب من 4 مليون نسمة .

3. الحدود الناقلة

تعتبر الحدود الناقلة transform boundaries أحد أنواع حدود الألواح . وتوجد تلك الحدود على امتداد الصدوع الناقلة ، حيث تنزلق الألواح أفقيا بالنسبة لبعضها البعض موازية تقريبا لاتجاه حركة اللوح . وبالرغم من أنه لا يتكون أو يستهلك غلاف صخري على امتداد الحد الناقل ، إلا أن الحركة بين اللوحين تتسبب في وجود نطاق من الصخور المحطمة بشدة ، وعديد من الزلازل ضحلة البؤرة .

والصدوع الناقلة transform faults هى صدوع رأسية تقريبا ، مضيئة الانزلاق تقطع الغلاف الصخري . وهى نوع خاص من الصدوع ينقل أو يغير نوع معين من الحركة بين الألواح إلى نوع آخر من الحركة . وتصل غالبية الصدوع الناقلة بين جزئين من الحيويد المحيطية ، إلا أن بعضها يصل أيضا بين الحيويد المحيطية والخنادق المحيطية ، وكذلك بين الخنادق والخنادق . وعلى الرغم من أن معظم الصدوع الناقلة



شكل (26.17): شكل يوضح التطور التكتوني لسلسلة جبال البحر الأحمر بالصحرى الشرقية المصرية ، التى تعتبر مثالا لاتدساس لوح محيطى تحت لوح آخر قارى .

- مرحلة قوس جزر island arc stage
- دفع تتابعات الأوفوليت والصخور البركانية المكونة لأقواس الجزر والتفتاتيات البركانية volcanoclasts على امتداد أسطح صدوع دسر thrust faults فوق حافة قارية قديمة
- مرحلة اتدساس وانصهار القشرة الأرضية وصعود الصهارة
- قطع جانبى (بروفيل) على امتداد طريق قفط - القصير بالصحرى الشرقية بمصر خلال المرحلة السابقة .

(After El-Gabi, S. List, F.K. and Tehrani, R., 1988: Geology, evolution and metallogenesis of the Pan-African Belt in Egypt. In El-Gabi and Greiling, R. (editors), The Pan-African belt of northeast Africa and adjacent areas, Friedr. Vieweg Sonh and Braunschweig/Wiesbaden).

ويتميز هذا الحد القارى بمميزات الحد القارى- المحيطى مع تكون خندق محيطى عميق وقوس بركانى . وفى النهاية ، فإن القشرة المحيطية تستهلك كلية وتصدع القارتان . ويتكون نطاق عريض يتميز

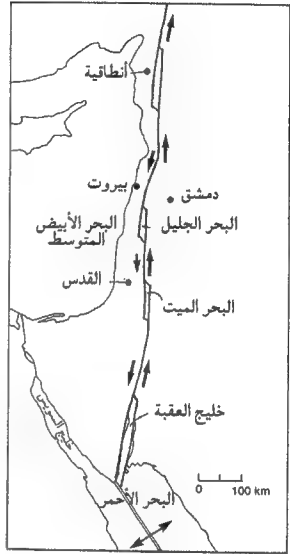
ومن المعروف أن عديدًا من الزلازل التي تؤثر في كاليفورنيا هي نتيجة الحركة على هذا الصدع . ويمثل نطاق صدع البحر الميت المقابل لصدع سان أندرياس في النصف الشرقي للكرة الأرضية . ويمتد نطاق صدع البحر الميت عبر فلسطين ، مما أدى إلى طوبوغرافية مميزة للمنطقة التي تضم أحواض خليج العقبة والبحر الميت وبحر الجليل (شكل 27.17) .

ب - حركة الألواح

تلقى فكرة حركة الألواح قبولًا واسعًا بين الجيولوجيين ، على الرغم من أن أسباب تلك الحركة مازالت محل جدل حتى الآن . وتتحرك الألواح بعيدًا عن حيوذ وسط المحيط أو أي محور انتشار . بينما تتحرك بعض الألواح ناحية الخنادق المحيطية . وستتناول فيما يلي الحركات النسبية والمطلقة للألواح ، وميكانيكية تحرك الألواح .

1 - الحركة النسبية للألواح

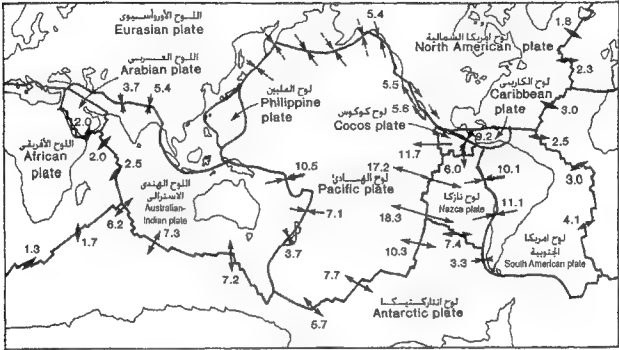
من المعروف أن كل الألواح تتحرك . لذلك لا يوجد كتلة فوق سطح الأرض غير متحركة تمامًا يمكن استخدامها كمرجع لتقدير حركة كل الأجزاء الأخرى المتحركة . ولقد أثبتت بعض الأدلة أن حيوذ وسط المحيط تتحرك فعلاً . فعندما يوجد لوحان متلامسان ، فإن حركتهما النسبية تحد ما إذا كان الحد بينهما نطاق انتشار أو نطاق اندساس أو صدع ناقل . ولكن ما السرعة التي تتحرك بها ألواح الكرة الأرضية وفي أي اتجاه تتحرك؟ وهل تتحرك كل الألواح بمعدل سرعة واحد؟ . يمكن حساب معدل تحرك الألواح بطرق عديدة ، ولكن أقل الطرق دقة هي طريقة تحديد عمر الرواسب الموجودة مباشرة فوق أي جزء من أجزاء القشرة المحيطية ، وقسمة هذا العمر على المسافة من حيوذ الانتشار ، وتعطى تلك الحسابات متوسط معدل تحرك اللوح .



شكل (27.17): خريطة توضح صدع البحر الميت (صدع ناقل transform fault) . يلاحظ وجود عدد من الأحواض بين الصدوع شبه المتوازية ، كما يميز حوض البحر الميت بأنه عميق ويبلغ سمك الرواسب به سبعة كيلومترات تحت سطح الماء .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

تقع في قشرة محيطية وتكون مميزة بنطاقات تكسير ، إلا أنها قد تمتد أيضًا في القارات . ويمثل صدع سان أندرياس San Andreas fault في كاليفورنيا أحد الأمثلة المعروفة للصدوع الناقلة ، حيث يفصل هذا الصدع بين لوح المحيط الهادى ولوح أمريكا الشمالية .



شكل (28.17): خريطة للألواح الرئيسية، وتوضح الأسهم اتجاهات حركة تلك الألواح، كما تظهر أيضا سرعة الحركة بالستيمتر في السنة. (After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters, 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

بينما اللوحان العربي والجزء الجنوبي من اللوح الأفريقي أكثر بطئا .

كما يمكن أيضا تقدير متوسط معدل التحرك وكذلك الحركة النسبية بين أى لوحين باستخدام تقنية أشعة الليزر. وعندما تبتعد الألواح عن بعضها البعض فإن شعاع الليزر يأخذ وقتا أكبر ليتحرك من المحطة المرسلة إلى القمر الصناعي الثابت ثم إلى المحطة المستقبلية . ويستخدم هذا الوقت الذى انقضى في حساب معدل الحركة والحركة النسبية بين اللوحين.

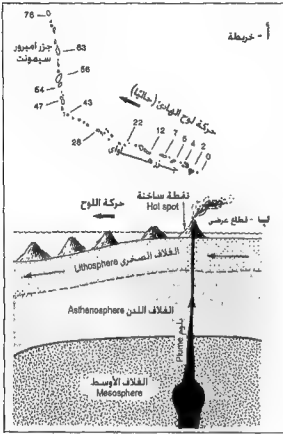
2. الحركات المطلقة للألواح

إن حركة الألواح المستنتجة من الانعكاسات المغناطيسية والأقمار الصناعية والليزر هى الحركة النسبية للوح ما بالنسبة للوح آخر . فعندما يتحرك لوحان ناحية بعضهما البعض بسرعة 2 سم/ سنة للوح الأول و 6 سم/ سنة للوح الثانى فإن معدل التقارب بين اللوحين يكون 8 سم/ سنة . ولكى نحصل على

وهناك طريقة أكثر دقة تشمل تحديد كل من متوسط معدل التحرك والحركة النسبية ، عن طريق تحديد عمر الانعكاسات المغناطيسية في قشرة قاع المحيط. وتشير المسافة بين محور الجيد المحيطى وأى انعكاس مغناطيسى إلى عرض قاع المحيط الجديد الذى تكوّن خلال تلك الفترة الزمنية . وهكذا فإنه كلما زاد عرض شريط قاع المحيط ، كانت السرعة التى تحرك بها اللوح أكبر . وبهذه الطريقة ، فإنه يمكن تحديد متوسط معدل التحرك الحالى والحركة النسبية ، بالإضافة إلى متوسط معدل التحرك فى الماضى ، عندما تتم قسمة المسافة بين الانعكاسات على الزمن المنقضى بين تلك الانعكاسات .

ومن الواضح من المعلومات المينة في شكل (28.17) أن معدل التحرك يتغير من لوح إلى آخر . كما يوضح الشكل أيضا أن الجزء الجنوبي الشرقى من لوح المحيط الهادئ ولوح كوكس هما أسرع الألواح تحركا ،

سلسلة هاواي ، وكلها تقدمنا أيضا في اتجاه شمال - شمال غرب على امتداد سلسلة إمبرور سيمونت .



شكل (29.17): نقطة ساخنة ومسارها .

أ) خريطة توضح سلسلة جزر هاواي - إمبرور سيمونت والبراكين التي يمتد بها البلوم بالصهارة . وتوضح الخريطة العمر المطلق للبراكين وحركة اللوح الهادي مع مرور الزمن .

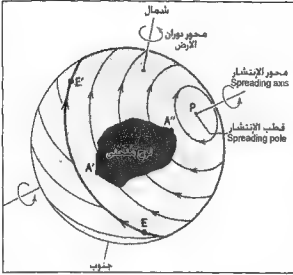
ب) قطاع عرضي يوضح صعود وشاح ساخنة ترتفع لأعلى عبر الغلاف اللدن (الآستينوسفير) والقشرة كبلوم plume البركان بالصهارة . وتغل النقطة الساخنة hot spot موقع نقطة صغيرة فوق سطح الأرض يشير إلى البلوم ، وهي نقطة ثابتة تقريبا . وكلها وأصل لوح الغلاف الصخري حركته تكونت براكين جديدة .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

ويرجع السبب في أن تلك الجزر والجبال البحرية تكون أقدم عمرا كلما تقدمنا ناحية الشمال والشمال الغربي إلى أن لوح المحيط الهادئ قد تحرك فوق بلوم من الوشاح مستقر ظاهريا . وهكذا تتكون البراكين

الحركة المطلقة ، فإنه يجب أن نجد مرجعا ثابتا يمكن حساب معدل حركة اللوح واتجاهه مثل وجود أي نقطة غير متحركة على سطح الوشاح في باطن الأرض . وهناك مثال مألوف يوضح الفرق بين الحركة المطلقة والحركة النسبية عندما تتجاوز سيارة على الطريق سيارة أخرى ، فإذا كان سائقو السيارتين لا يريان بعضهما البعض ولا يستطيعان ملاحظة الأرض أو أي شيء ثابت خارج سيارتهما ، فإنيهما يستطيعان فقط تقدير الفرق في السرعة بين السيارتين . فعندما تتجاوز سيارة سرعتها 100 كم/ ساعة سيارة أخرى سرعتها 90 كم/ ساعة فيمكن في هذه الحالة تقدير السرعة النسبية فقط ، وهي 10 كم . ومن ناحية أخرى ، إذا استطاع السائقان قياس سرعة سيارتهما بالنسبة لشيء مرجعي ثابت ، مثل سطح الأرض فإنيهما يستطيعان تقدير سرعتين المطلقتين لسيارتهما وهما 100 كم/ ساعة و 90 كم/ ساعة . ويمكن اتخاذ النقاط الساخنة hot spots كنقاط مرجعية . وتعرف النقاط الساخنة بأنها مواقع نقاط صغيرة فوق سطح الأرض ، تصعد إليها ببطء أعمدة مستقرة من تيارات الصهارة التي تنشأ على أعناق كبيرة في الوشاح (بلومات وشاح mantle plumes) ، وتكون تلك الأعمدة براكين أو فيوضا بازلية (شكل 29.17) .

وتعتبر سلسلة جزر إمبرور سيمونت Emperor Seamount Chain بهاواي أحد الأمثلة المهمة على النشاط البركاني فوق نقطة ساخنة . وتوجد البراكين النشطة في هذه السلسلة من الجزر البركانية فوق جزيرة هاواي Hawaii island ولويس سيمونت Loihi Seamount . وقد نشأت بقية الجزر والجبال البحرية في تلك الجزر من أصل بركاني أيضا . وهي تكون أقدم عمرا كلما تقدمنا في اتجاه غرب - شمال غرب على امتداد



شكل (30.17): حركة لوح منحني على كرة . يمكن وصف حركة أى لوح من الغلاف الصخري على سطح الأرض كدوران حول محور دوران اللوح نفسه . وتساوى سرعة اللوح صفراً عند النقطة (P)؛ لأنها النقطة الثابتة التي يحدث حولها الدوران ، بينما تكون السرعة القصوى عند النقطة (A') والتي تقع بالقرب من خط الاستواء EE' ، أما النقطة A'' عند حافة اللوح فتكون سرعتها بطيئة لأنها أقرب إلى قطب دوران اللوح .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

مثل طفو قطعة من الخشب فوق الماء . ولكن الغلاف الصخري يتكون من ألواح تحيط بجسم الأرض الكروي ، وتكون هذه الألواح منحنية أو مقوسة وليست منبسطة . وتشير هندسة الغلاف الكروي ، إلى أن الحركة على السطح تكون دورانا حول محور . ونتيجة لمثل ذلك الدوران ، فإن الأجزاء المختلفة من اللوح الواحد تتحرك بسرعات مختلفة (شكل 30.17) ؛ حيث يتحرك اللوح في الشكل السابق ويدور حول محور خاص يسمى محور دوران اللوح plate rotation axis مستقلا عن دوران الأرض حول محورها . وتعرف النقطة P في الشكل السابق ، والتي تمثل نقطة اختراق محور الانتشار لسطح الأرض ، بقطب دوران اللوح pole rotation plate .

على امتداد خط بالقرب من وسط لوح المحيط الهادى محدة اتجاه حركة اللوح المحيطى . وفي حالة سلسلة إمبرور سيمونت بجزر هاواى فقد تحرك لوح المحيط الهادى أولا في اتجاه شمال - شمال غرب ثم في اتجاه غرب - شمال غرب فوق نفس البلوم (شكل 29.17).

وتساعد البلومات والنقاط الساخنة الجيولوجيين في شرح بعض النشاط الجيولوجى الذى يحدث داخل الألواح ، حيث إن معظم النشاط الجيولوجى يحدث عند حدود الألواح أو بالقرب منها . وبالإضافة إلى ذلك ، فإذا كانت بلومات الوشاح ثابتة تقريبا بالنسبة لمحور دوران الأرض - على الرغم من أن بعض الدلائل تدل على عكس ذلك- فإنه يمكن استخدام البلومات كنقاط مرجعية لتحديد خطوط العرض القديمة .

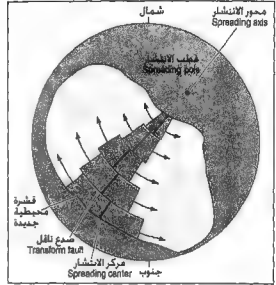
3. التغير في سرعة الألواح

تكون السرعة النسبية لبعض الألواح الكبيرة أكبر بكثير من سرعة الألواح الأخرى (شكل 28.17) . ويبدو أن هذا الاختلاف في سرعة الألواح مرتبط بحجم الغلاف الصخري القارى ؛ فالألواح التى تتكون من غلاف صخري محيطى فقط تكون سرعتها النسبية أكبر ، مثل سرعة ألواح المحيط الهادى ونازكا وكوكوس ، بينما تكون السرعة النسبية للألواح التى لها غلاف صخري قارى مسميك أقل ، مثل اللوح الأفريقى ولوح أمريكا الشمالية والأوروآسيوى .

ويرجع السبب الثانى في تغير سرعة الألواح إلى نوعية الحركة على جسم كروي ؛ حيث يفترض أن كل النقاط فوق اللوح الواحد تتحرك بالسرعة نفسها ، ولكن هذا غير صحيح . وقد يكون هذا الاعتقاد صحيحا ، إذا كانت ألواح الغلاف الصخري منبسطة وتحرك فوق غلاف لدن (أستينوسفير) منبسط أيضا ،

4. الميكانيكية المحركة لتكتونية الألواح

لقد كانت العقبة الرئيسية أمام قبول نظرية الانجراف القارى عدم وجود الميكانيكية المحركة لشرح حركة القارات . وعندما اتضح أن القارات وقيعان المحيطات تحركت مع بعضها وليست منفصلة عن بعضها البعض ، وأن قشرة محيطية جديدة تكونت عند حيود الانتشار من الصهارة الصاعدة ، قُبل معظم الجيولوجيين وجود نوع من نظام الحمل الحرارى كعملية أساسية مسئولة عن حركة الألواح . وعلى الرغم من ذلك فما زال التساؤل قائما ، عن الميكانيكية التى تسبب حركة الألواح .



شكل (31.17): العلاقة بين محور دوران اللوح **plate rotation** axis والمحيط والصدع الناقلة في لوحين متجاورين ، لها مركز دوران مشترك ، وكل منهما مقطوع بصدع ناقل ، وتقع كل قطعة من الحيد المحيطي **oceanic ridge** على خط طول يمر خلال قطب دوران اللوح **plate rotation pole** ، بينما يقع كل صدع ناقل على خط مشابه لخط عرض حول قطب الدوران . ويزداد مرض القشرة المحيطية الجديدة كلما ابتعدنا عن قطب دوران اللوح .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

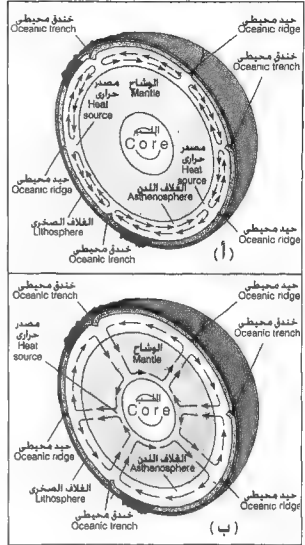
وكما سبق أن أوضحنا ، فإنه يمكن وصف الوشاح بأنه مادة ساخنة صلبة قادرة على الانسياب وبسرعة تصل لعدة سنتيمترات في العام . وقد اقترح نموذجان لشرح حركة الألواح ، يشتمل كل منهما على خلايا حمل حرارية **thermal convection cells** (شكل 32.17) . وفى أحد النموذجين ، ينحصر وجود خلايا الحمل الحرارى فى الغلاف اللدن (الأسينوسفير) ، أى فى الجزء العلوى من الوشاح فقط ، بينما تشتمل تلك الخلايا كسل الوشاح فى النموذج الثانى . وفى كلا النظامين يميز حيود الانتشار **spreading ridges** الأجزاء الصاعدة من خلايا الحمل الحرارى ، بينما توجد الخنادق المحيطية عند الأماكن التى تهبط فيها خلايا الحمل الحرارى ، وتعود مرة أخرى إلى باطن الأرض . وهكذا يتم تحديد مواقع حيود الانتشار والخنادق المحيطية بواسطة خلايا الحمل الحرارى . وهكذا فإن كل لوح يقابل خلية حمل حرارى واحدة .

ويمكن وصف حركة كل لوح من ألواح القشرة الأرضية فى ضوء الدوران حول محور الانتشار ؛ حيث تعتمد سرعة كل نقطة على اللوح على المسافة بين هذه النقطة وقطب الانتشار . ونتيجة لاختلاف السرعات على اللوح الواحد ، فإن عرض القشرة المحيطية الجديدة التى تحد مركز الانتشار **spreading center** تزداد مع زيادة المسافة بين تلك القشرة وقطب الانتشار (شكل 31.17) . والنتيجة الثانية لهذا الاختلاف فى السرعات أن إسقاط مركز الانتشار الذى تتباعد الألواح المحيطية على امتداده يمر عبر قطب الانتشار ، حيث يائل هذا الإسقاط خط طول يمر خلال قطب الانتشار ، بينما يقع كل صدع ناقل على خط مشابه لخط عرض حول قطب الانتشار .

(الأسثينوسفير) ، بينما يعتقد في النموذج الثاني ، أن مصدر الحرارة يأتي من اللب الخارجي للأرض . ولكن لا زالت ميكانيكية انتقال الحرارة من اللب الخارجي إلى الوشاح مجهولة حتى الآن ، وكذلك لماذا تشمل خلايا الحمل الحراري كلا من الوشاح السفلي والغلاف اللدن ؟ .

ويقترح بعض الجيولوجيين أنه بالإضافة إلى خلايا الحمل الحراري داخل الأرض ، فإن حركة الألواح تحدث جزئيا أيضا بسبب ميكانيكية أخرى تشمل ما يعرف بجذب أو سحب اللوح "slab-pull" أو دفع الحيد "ridge push" . وتعتبر الجاذبية الأرضية هي العامل المحرك في كل من الميكانيكيتين المقترحتين ، بالإضافة إلى الفروق في درجات الحرارة داخل الأرض . ففي ميكانيكية "جذب اللوح" يجذب اللوح البارد المنحدر من الغلاف الصخري بقية اللوح معه أثناء هبوطه واندساسه في الغلاف اللدن ، نظراً لأنه أعلى كثافة من صخور الغلاف اللدن الأكثر دفئاً والمحيط باللوح المهابط . وعندما يهبط الغلاف الصخري لأسفل ، فإنه يحدث انسياب مقابل لأعلى في حيز الانتشار نتيجة تصاعد الصهارة .

وتعمل في الوقت نفسه مع ميكانيكية "جذب اللوح" ميكانيكية أخرى ، هي "دفع الحيد" فتنتيجة لصعود الصهارة فإن الحيز المحيطية تكون أعلى من القشرة المحيطية المجاورة . ويعتقد أن الجاذبية تدفع الغلاف الصخري المحيطي نتيجة وزن الحيد المرفوع بعيداً عن حيز الانتشار وفي اتجاه الخنادق المحيطية . ولم يتضح بعد إلى أي حد يمكن أن تساهم أي من الميكانيكيتين في حركة الألواح . ولذلك ، فإن نظرية تكوينية الألواح لم تكتمل حتى الآن



شكل (32.17): نموذجان لشرح كيف تعمل تيارات الحمل على تحريك الألواح .

(أ) في النموذج الأول يقتصر وجود خلايا الحمل الحرارية على الغلاف اللدن (الأسثينوسفير)

(ب) في النموذج الثاني تشمل خلايا الحمل الوشاح بأكمله .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

وعلى الرغم من أن معظم الجيولوجيين يتفقون على أن باطن الأرض يلعب دوراً مهماً في حركة الألواح ، إلا أن هناك مشكلات تواجه كلا من النموذجين السابقين . والمشكلة الأساسية التي تواجه النموذج الأول هو صعوبة شرح مصدر الحرارة اللازم لخلايا الحمل ، ولماذا تنحصر هذه الخلايا في الغلاف اللدن

VI- تكتونية الألواح والرواسب المعدنية

تؤثر تكتونية الألواح - بالإضافة إلى كونها مسئلة عن المعالم الرئيسية للقشرة الأرضية - في تكوين وتوزيع بعض مصادر الثروة الطبيعية. ولذلك ، يستخدم الجيولوجيون نظرية تكتونية الألواح في البحث عن رواسب معدنية جديدة وفي شرح تواجدها والرواسب المعروفة. وسيتم مناقشة العلاقة بين تكتونية الألواح والرواسب المعدنية في الفصل التاسع عشر.

الملخص

1- إن مفهوم حركة الألواح ليس جديداً ؛ فقد أمدتنا الخرائط الأولى التي توضح التشابه بين الساحل الشرقي لأمريكا الجنوبية والساحل الغربي لأفريقيا بالدليل الأول على أن القارات ربما كانت متحدة يوماً ما ، ثم انفصلت بعد ذلك عن بعضها البعض.

2- يرجع الفضل في تطور فرضية الانجراف القاري إلى ألفريد فاجنر الذي قدم عديداً من الأدلة الجيولوجية والحفرية ليوضح أن القارات كانت متحدة في قارة واحدة عظمى أسماها بانجيا. ول سوء الحظ لم ينتج فاجنر في شرح كيف تحركت القارات ، ولذلك أهمل معظم الجيولوجيين أفكاره.

3- ازدهرت فرضية الانجراف القاري خلال خمسينيات القرن العشرين ، حيث أوضحت دراسة المغناطيسية القديمة وجود عديد من أقطاب مغناطيسية شمالية بدلاً من قطب شمالي واحد ، كما هو الوضع حالياً . ولقد تم حل تلك المشكلة بتحريك القارات إلى مواقع مختلفة ،

بحيث تتفق نتائج المغناطيسية القديمة مع وجود قطب مغناطيسي شمالي واحد.

4- أظهرت نتائج المسح المغناطيسي للقشرة المحيطية وجود شاذات مغناطيسية في الصخور تشير إلى أن المجال المغناطيسي للأرض انعكس في الماضي كثيراً من المرات . وحيث إن تلك الشاذات تكون أحزمة متناظرة ومتوازية على جانبي الحيود المحيطية ، فإن تلك النتائج تشير إلى أن هناك قشرة محيطية جديدة قد تكونت أثناء انتشار قاع المحيط.

5- تأكدت فرضية انتشار قيعان المحيطات نتيجة تقدير عمر الرواسب التي تعلو القشرة المحيطية ، والتاريخ الإشعاعي لصخور الجزر المحيطية. وتوضح تلك الأعمار أن القشرة المحيطية تصبح أقدم في العمر كلما بدت عن الحيدود المحيطية.

6- لاقت نظرية تكتونية الألواح قبولاً واسعاً خلال سبعينيات القرن العشرين نتيجة تجمع عدد كبير من الأدلة التي تدعم تلك النظرية ، وبسبب أن تلك النظرية أمدت الجيولوجيين بشرح لبعض الظواهر المهمة مثل النشاط البركاني والنشاط الزلزالي وبناء الجبال وتغير مناخ الأرض وتوزيع النباتات والحيوانات في الماضي والوقت الحاضر وتوزيع الرواسب المعدنية.

7- تركزت نظرية تكتونية الألواح على نموذج بسيط للأرض ، حيث يتكون الغلاف الصخري الصلب للأرض من عدد من القطع المختلفة الحجم ، والتي تسعى ألواحاً .

8- تم التعرف على ثلاثة أنواع من حدود الألواح وهي الحدود المتباعدة حيث تتحرك الألواح بعيداً عن بعضها البعض ، والحدود المتقاربة حيث

- 11- على الرغم من عدم تقديم نظرية شاملة عن الميكانيكية التي تسبب حركة الألواح حتى الآن، إلا أن معظم الجيولوجيين يقترحون وجود نوع من نظام حمل حرارى يسبب حركة الألواح.
- 9- يمكن حساب متوسط معدل حركة الألواح وحركتها النسبية بعدة طرق. وتتفق نتائج هذه الطرق المختلفة وتشير إلى أن الألواح تتحرك بسرعات مختلفة.
- 10- يمكن حساب الحركة المطلقة للألواح من حركة الألواح فوق بلومات الوشاح. ويلوم الوشاح هو عمود ثابت ظاهر من الصهارة التي تصعد إلى سطح الأرض ؛ لتصبح نقطة ساخنة وتكون بركائنا .
- 12- توجد علاقة قوية بين تكون وتوزيع بعض الرواسب المعدنية وحدود الألواح. ويستخدم الجيولوجيون نظرية تكتونية الألواح في شرح تواجيدات الرواسب المعدنية المعروفة ، وفي البحث عن رواسب معدنية جديدة.

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

<http://webspinners.com/djblanc/teclonic/plABCs.shtml>
<http://pubs.usgs.gov/publications/text/dynamic.html>
<http://www.uky.edu/ArtsSciences/Geology/webdogs/plates/reconstructions.html>
<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/images.html>
<http://imager.ldeo.columbia.edu/>
<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/mggd.html>
<http://www-odp.lamu.edu/>

المصطلحات المهمة

backarc basin	Pangaea = Pangea	بانجيا (القارة الأم)
continental- continental plate boundary	plate حد لوح قارى - قارى	لوح
continental drift	plate rotation axis	محور دوران اللوح
continental volcanic arc	plate rotation pole	قطب دوران اللوح
convergent plate boundary	plate tectonic theory	نظرية تكتونية الألواح
divergent plate boundary	rift valley	وادي خسف
forearc basin	seafloor spreading	انتشار قيعان المحيطات
Glossopteris flora	sheeted dykes	قواطع صفائحية
Gondwana	spreading centers	مراكز انتشار
hot spot	spreading ridge	حيود انتشار (حيود انفراج)
Laurasia	subduction	اندساس
magmatic arc	thermal convection cell	خلية حمل حرارى
magnetic reversal	transform boundary	حد ناقل
oceanic - continental plate boundary	transform fault	صدع ناقل
oceanic - oceanic plate boundary	volcanic island arc	قوس جزر بركانى
ophiolite suite	مجموعة أوفولييتيه	
orogeny	تجبل (نشأة الجبال)	

الأسئلة

- 1- ما الأدلة التي أقنعت فاجنر أن القارات كانت ملتحمة يوماً ما ثم انفصلت بعد ذلك؟ ولماذا عارض العلماء قبول فكرة فاجنر في بداية الأمر؟
- 2- لماذا لا يمكن استخدام التشابه بين خطوط شواطئ القارات وحده كدليل على أن تلك القارات كانت متصلة يوماً ما؟
- 3- اذكر أهمية التجوال القطبي وعلاقته بالانجراف الفاري.
- 4- كيف يمكن استخدام الشاذات المغناطيسية لتفسير انتشار قيعان المحيطات؟ وما الأدلة الأخرى التي أقنعت الجيولوجيين بتلك الفرضية؟
- 5- لماذا تعتبر تكتونية الألواح نظرية شاملة وقوية؟
- 6- اذكر باختصار الملامح الجيولوجية المميزة للأنواع الثلاثة من حدود الألواح، اذكر مثلاً جغرافياً لكل نوع.
- 7- ما بلومات الوشاح وما النقاط الساخنة؟ وكيف يمكن استخدامها لتحديد اتجاه ومعدل حركة الألواح؟
- 8- ما الميكانيكية التي تسبب حركة الألواح؟
- 9- ما أنواع الصخور التي تتوقع أن تجدها بالقرب من حد تباعد، وأيضاً بالقرب من حد تقارب؟
- 10- ما الظروف التي أدت إلى تكون جبال الهمالايا والأنديز؟
- 11- عرف الميلانج، وما نوع التحول المصاحب لصخور الميلانج. وما الأماكن التي تتوقع أن تتكون فيها صخور الميلانج حالياً؟
- 12- ما قطب الانتشار؟ وكيف تعتمد سرعة اللوح على موقع اللوح بالنسبة لقطب الانتشار؟
- 13- كيف يمكن قياس سرعة الألواح؟ هل يعتبر تحديد عمر الانعكاسات المغناطيسية في قشرة قاع المحيط تقديرًا للسرعة النسبية أم السرعة المطلقة للألواح؟

الفصل

18

تكتونية القشرة القارية وسلاسل الجبال

- أ. بعض التراكيب التكتونية الإقليمية
- II. الأجزاء الداخلية المستقرة من القارات
- III. أحزمة التجبل: بناء الجبال
 - أ. تراكيب الجبال
 - ب. عمليات بناء الجبال
 1. بناء الجبال وأقواس الجزر: التجبل عند حدود الألواح المحيطية-المحيطية
 2. بناء الجبال على امتداد الحواف القارية: التجبل عند حدود الألواح المحيطية-القارية
 3. بناء الجبال نتيجة التصادم القاري: التجبل عند حدود الألواح القارية-القارية
 4. بناء الجبال وتكتونية الألواح الصغيرة
- IV. خسف القارات
 - أ. الخسف ثلاثي الأذرع والنقاط الساخنة
 - ب. المعالم الجيولوجية لوديان الخسف القارية
- V. الحواف المستقرة للقارات
- VI. الحركات الرأسية الإقليمية

وقد أظهرت الدراسات الحديثة أن رفع سلاسل الجبال يمكن أن يؤثر على المناخ في العالم ، كما يغير أيضا من كيميائية المحيطات ومواقع تجمعات البترول والرواسب المعدنية أيضاً.

ويوضح البناء الجيولوجي للقارات أنها تتكون من (1) بقايا صخور قديمة جداً تم تعريضها داخل القارات، و (2) منظومات الجبال mountain systems بالقرب من حواف تلك القارات ، والتي نشوئت في زمن أحدث . وتحدث عمليات بناء الجبال عندما تصطدم الألواح القارية ، حيث تشوه وتُدفع رواسب الحواف القارية في سلسلة مطوية ومتصدعة. كما تحدث عمليات بناء الجبال عندما ينصهر اللوح المحيطي المنسحب تحت لوح محيطي أو لوح قاري ، وتصعد الصهارة في الحزام المشوه. وتتسبب تحركات الألواح أيضاً في نقل أجزاء مختلفة جيولوجياً ثم التحامها بذلك الحزام المشوه. وتؤدي التحركات لأعلى ولأسفل داخل القارات إلى نشأة أحواض داخلية interior basins وقياب domes وبقاء الجبال القديمة التي تم تعريضها مرة أخرى. ويبدأ عن الشواطئ، فإن التحركات إلى أسفل تسبب نشأة أحواض على الرفوف القارية. ويعالج هذا الفصل ، بعض التشوهات التي حدثت للقشرة الأرضية خلال الأربعة بلايين سنة الأخيرة من عمر الأرض .

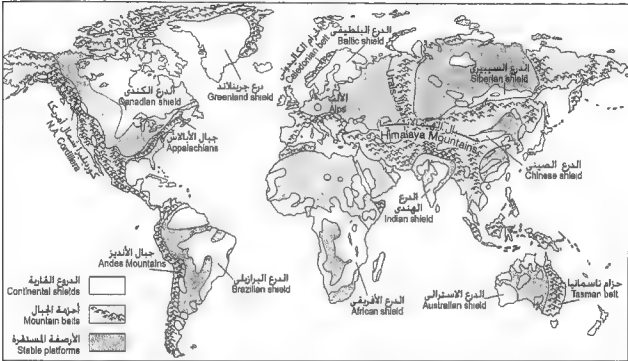
أ. بعض التراكيب التكتونية الإقليمية

تغطي القارات حوالي ثلث سطح الأرض. ويمكن تقسيم الصخور التي تكون القشرة القارية إلى مجموعتين متميزتين:

تغطي المحيطات حوالي 71٪ من سطح الأرض. ويوجد أسفل أحواض المحيطات قشرة محيطية يقل عمرها عن 200 مليون سنة . وتنشأ أحواض المحيطات عند جيود وسط المحيط ، حيث يتكون باستمرار غلاف صخري جديد من الصهير الصاعد من الوشاح ، والذي ينتشر ويبرد . وحيث إن الغلاف الصخري المحيطي يستهلك حينها يهبط في نطاقات الاندساس، فإن قيعان المحيطات الحالية، لا تمثل إلا 4٪ فقط من تاريخ الأرض ، الذي يصل إلى حوالي 4.6 بليون سنة. بينما تحتوي القارات على صخور يرجع عمرها إلى حوالي 4 بليون سنة ؛ لذلك يجب فحص صخور القارات التي تشمل معظم التاريخ الجيولوجي؛ حيث يعتقد أن صخور القشرة الأرضية التي تكونت خلال الخمسمائة مليون سنة الأولى من تاريخ الأرض قد دمرت واستهلكنت نتيجة قذفها بشدة بالنيازك في ذلك الوقت المبكر من تاريخ الأرض .

ويعتقد أن فترة الأربعة بلايين سنة من التطور الجيولوجي المسجلة في القشرة القارية هي فترة طويلة ومعقدة. ومع ذلك، فإننا بدأنا في تفسيرها وفهمها بطريقة أفضل اعتماداً على بعض المفاهيم المستمدة من نظرية تكتونية الألواح . ويعتقد الآن أن التشوه يتم فقط في قشرة الأرض الصلبة الخارجية أى في الغلاف الصخري الذي يتراوح سمكه بين 100 و 200 كم. وهذا السمك يعتبر قليلاً جداً إذا ما قورن بسمك الوشاح ولب الأرض الذي يبلغ حوالي 6300 كم. وترجع أهمية دراسة سلاسل الجبال إلى معرفة تاريخ الأرض وتشوهها وأصل الرواسب المعدنية ، بالإضافة إلى معرفة تأثير الجبال على جيولوجية وجغرافية العالم .

- 1- صخور رسوبية غير مشوهة: وهي تشمل غطاء الصخور الرسوبية الذي تم ترسيبه ولم يتشوه بدرجة كبيرة.
- 2- صخور مشوهة: وهي تشمل المناطق المشوهة، والتي تتكون من صخور رسوبية ونارية ومتحولة تعرضت لقوى أرضية شديدة خلال العصور الجيولوجية المختلفة.



شكل (1.18): خريطة توضح الدروع القارية continental shields ومعظم أحزمة الجبال mountain belts الرئيسية في العالم .

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An Introduction to Physical Geology, 7th edition, Macmillan Publishing Company, New York).

وتقع معظم القشرة القارية، سواء المنكشفة أو صخور القاعدة المدفونة تحت غطاء الصخور الرسوبية المتطبقة (وأحياناً صخور بركانية) ضمن صخور المجموعة الثانية، أي الصخور التي تشوهت وتغيرت نتيجة قوى القشرة الأرضية. وتمثل صخور القاعدة basement rocks تجمعات من الصخور النارية والمتحولة (عادة ما تكون من صخور ما قبل الكامبري أو الباليوزوي). ولذلك ترتبط بقوة عملية التجبل orogeny - وهي عمليات بناء الجبال والتي تشمل القديمة أحزمة الجبال النشطة الأحداث عمرا، والتي تكون معظم أنظمة الجبال الموجودة حالياً. وتقع أحزمة الجبال هذه عند حواف القارات حيث توضع ملامعها الطوبوغرافية أنها تتواجد في أحزمة ضيقة وطويلة، مثل حزام الكورديليرا الذي يمتد على الحواف الغربية لأمريكا الشمالية وحزام الأبالاش الذي يمتد على الحافة الشرقية لأمريكا الشمالية، كما تمتد سلاسل الألب-الهمالايا عبر الحدود الجنوبية لآسيا وأوروبا (شكل 1.18). وتعمل معظم أحزمة الجبال التي تشمل

جدول 18-1: التراكيب الرئيسية أو العناصر التكتونية المكونة للقشرة الأرضية

العناصر المستقرة	العناصر غير المستقرة
الرسبخات القارية continental cratons - سهول قارية منبسطة ومنخفضة التضاريس ، مع نشاط زلزالي أو بركاني قليل وقشرة فلسية (جرانيتية).	أحزمة التجبل orogenic belts - (أحزمة الجبال وأنظمة أقواس الجزر - الحنادق المحيطية) - براكين أنديزيتية، نشاط زلزالي ضحل إلى عميق ، طى نتيجة قوى التضغوط وصدوع دسر، وتداخل بائوليتات جرانيتية ، تحول إقليمى ، سريان حرارى قليل.
السهول السحيقية المحيطية oceanic abyssal plains - سهول متسعة مسطحة من قاع المحيط ، مع نشاط زلزالي أو بركاني قليل لقشرة بازلتية.	الحيود المحيطية oceanic ridges - جبال بازلتية فوق قيعان المحيطات مع نشاط زلزالي ضحل ، صدوع نتيجة قوى الشد وانسياب حرارى عالي غير عادي.

(Prothero, D.R. and Dott, Jr, R.H.; Evolution of the Earth, 2002)

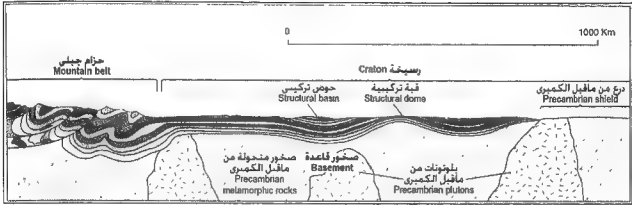
شاسعة وتكون مستقرة تكتونيا . وتتكون الرسبخات من الصخور القديمة التي تشوهت بشدة خلال زمن ما قبل الكامبري وأصبحت مستقرة منذ ذلك الوقت. وتشمل الرسبخات مساحات كبيرة تسمى دروع **shields** ، وهي تتكون من صخور القاعدة المتبلورة القديمة جداً التي انكشف من تلك الرسبخات. وتمثل الدروع وصخور القاعدة في الرسبخات جذور أحزمة جبال اكتملت عملية تشوهها منذ أكثر من بليون سنة مضت . ويمتد للخارج من تلك الدروع أرصفة **platforms** مستوية وعريضة من الصخور القديمة تكون مدفونة تحت رسوبيات وصخور رسوبية أحدث عمراً (شكل 2.18).

وهكذا تشمل الرسبخات كلاً من الدروع والأرصفة المدفونة ، حيث إن الأرصفة تمثل جزءاً من الرسبخة . ويمثل الدرع الكندي نموذجاً للدرع (شكل 3.18) ، وهو يتكون في معظمه من صخور جرانيتية ومتحولة (مثل النيس) مع صخور رسوبية وبركانية متحولة مشوهة بدرجة كبيرة. وتشير تلك التجمعات من الصخور إلى فترات بناء الجبال الشديدة خلال زمن

مدودا جبليه مرتفعة لأن تكون أحدث عمراً من تلك الجبال المنخفضة تضاريسياً . فقد بدأت عملية بناء جبال الهيمالايا ، والتي تشمل أعلى أحزمة الجبال في العالم ، من حوالي أربعين إلى خمسين مليون سنة فقط ، ومازالت في حالة نشاط حتى الآن ، بينما توقفت عملية بناء جبال أحزمة الأبالاش المنخفضة تضاريسياً منذ حوالي 250 مليون سنة . ويوضح جدول (18-1) العناصر التكتونية للقشرة الأرضية والتي تشمل العناصر المستقرة وغير المستقرة (النشطة) . وتنمو القارات عموماً من تجمع أجزاء من ألواح صغيرة بالتصادم ، علاوة على إضافة مواد جديدة عند اندساس الألواح المحيطية . وتمثل الأحزمة الموجزة على حواف القارات المفتاح الذي يكشف العملية التي تؤدي إلى تشوه القشرة الأرضية القديمة ، حيث مازال يوجد بها الكثير من سجل التشوه محفوظاً في الصخور التي لم يتم تعريضها.

II. الأجزاء الداخلية المستقرة من القارات

تعرف الرسبخات **cratons** بأنها الأجزاء الداخلية المسطحة من القارات ، والتي تغطي مساحات



شكل (2.18): قطاع عرضي في جزء من حزام جبل mountain belt (إلى اليسار) وجزء من رسيخة craton. ويوضح الشكل أن الصخور الرسوبية فوق صخور القاعدة قد تعرضت لتقوس وانحناء لطيف على مستو إقليمي واسع، بينما تعرض الحزام الجبلي لشوه متوسط إلى شديد جدا. لاحظ أن الدرع shield يمثل صخور قاعدة متبلورة قديمة جداً انكشفت من الرسيخة craton.

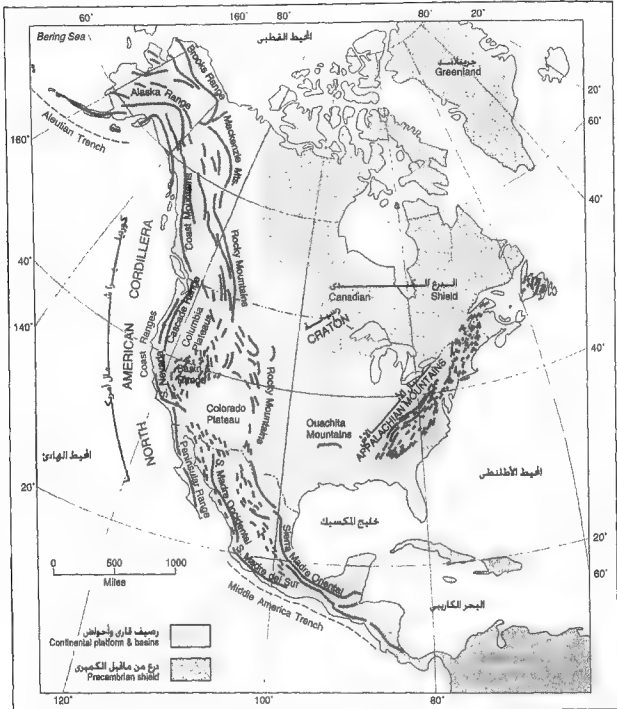
(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

الرسوبية يبلغ سمكها أقل من 2 كم تقريباً تتبع حقب الحياة القديمة (الباليوزوي).

وقد وجدت رواسب الرصيف القاري في شمال أمريكا فوق صخور القاعدة المشوهة منذ ما قبل الكمبري والتي تم تعريضها تحت ظروف مختلفة. وتدل تجمعات تلك الصخور على أنها ترسبت في بحار فوق قارية ضحلة عمدة (صخور بحرية تشمل الحجر الرمل والحجر الجيري والطفل ورواسب دلتا ومتبخرات) وفي سهول طميية أو في بحيرات أو مستنقعات (رواسب غير بحرية ورواسب فحم). وتوجد معظم رواسب خامات اليورانيوم والفحم بالإضافة إلى الغاز والنفط في الغطاء الرسوبي للرصيف المشار إليه.

ما قبل الكمبري، والتي أعقبها فترة طويلة من الاستقرار، حيث يدل عدم وجود تشوه حديث على استقرارها. وتشمل هذه المنطقة أحد أقدم سجلات التاريخ الجيولوجي. ويتميز الدرع الكندي بتواجد رواسب خامات الحديد والذهب والنحاس والنيكل. كما توجد دروع أخرى في اسكندنافيا وفنلندا وسيبيريا ووسط أفريقيا والبرازيل وأستراليا (شكل 1.18).

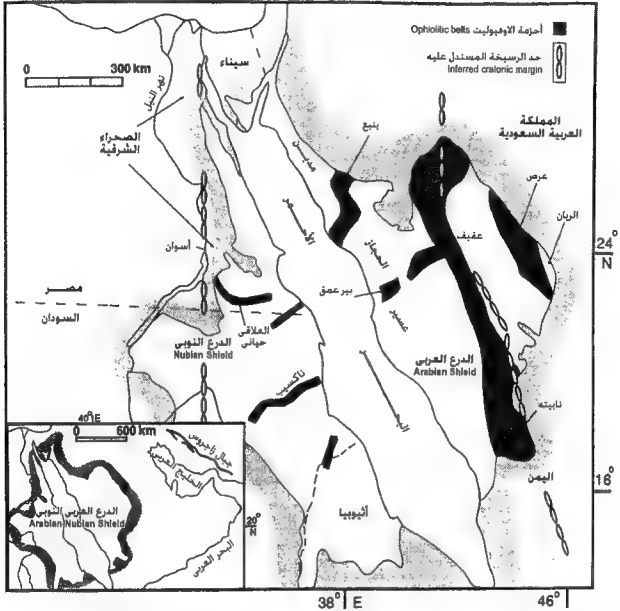
ويوجد جنوب الدرع الكندي منطقة الرصيف الداخلي المغطاة بالرواسب، والتي تكون مستوية تقريباً (شكل 3.18)، وهي تشكل المنطقة الوسطى المستقرة من الولايات المتحدة. ويمثل هذا الرصيف امتداداً مستوياً تقريباً تحت سطح الأرض للدرع الكندي، حيث يشمل صخور قاعدة مشابهة من ما قبل الكمبري ولكنها مغطاة في تلك المنطقة بغطاء من الصخور



شكل (3.18). الملامح التكتونية الرئيسية لأمريكا الشمالية وتشمل الدرع الكندي والرفيف الداخلي وحزام الكورديليرا وهضبة كولورادو وحزام جبال الأبالاش وبعض الجبال الرئيسية الأخرى.

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlos, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

ويشغل الدرع العربي النوبي Arabian-Nubian Shield مساحات كبيرة تصل إلى حوالي 10 مليون كيلومتر مربع في شمال أفريقيا وغرب المملكة العربية السعودية ، وهو مثال جيد على حدوث نشاط صهاري عند حدود ألواح متقاربة convergent boundaries.



شكل (4.18): خريطة توضح الدرع العربي النوبي Arabian-Nubian Shield الذي يشمل عددا من الألواح الصغيرة التي التحتمت عند نطاقات درز suture zones . وتتميز أحزمة الأوفيويت والموضحة باللون الأسود نطاقات الدرز المختلفة في الدرع العربي النوبي (ANS) . لاحظ امتداد منحور الدرع العربي النوبي تحت غطاء من الصخور الرسوبية من دهر الحياة الظاهرة (القائريوزوي) من نهر النيل غربا إلى جبال زاغروس شرقا .

(After Sultan, M., Bickford, M.E., El Kaliouby, B. and Arvidson, R.E., 1992: Common Pb systematics of Precambrian granitic rocks of the Nubian Shield, Egypt and tectonic implications. Geol. Soc. Am. Bull., V.104, 456-470).

وعلى الرغم من إجماع معظم الدراسات على أهمية دور تكتونية الألواح في نشأة الدرع العربي النوبي ، إلا أنه لازال هناك خلاف بين العلماء حول ميكانيكية تكوين القشرة الأرضية في هذا الدرع ؛ حيث يعتقد بعض العلماء أنه نشأ في زمن البروتيروزوي المتأخر (860 – 560 مليون سنة مضت) عند حافة قارية التحتمت بها عدة أقواس جزر oceanic island thrust arcs اندفعت على امتداد أسطح صدوع دسر

أو الاتجاه ، مثل جبال روكى والأبالاش . وتعرف المنظومات الجبلية بأنها نطاقات طولية معقدة ، تتميز بالتشوه الشديد وزيادة في سمك القشرة الأرضية وبعض التراكيب الجيولوجية التى سبق شرحها . أما سلسلة الجبال **mountain chain** فهى سلسلة متصلة تضم عددا من المدود الجبلية ومنظومات الجبال المتوازية تقريبا ، تتجمع كلها في سلسلة متصلة واحدة دون اعتبار لتماثلها في الشكل أو التركيب أو العمر ، لكنها تشكل اتجاهها محدد .

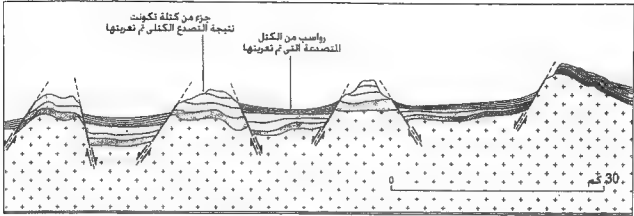
وتُعرف العمليات التى تؤدى إلى نشأة سلاسل الجبال بالتجبل (بناء الجبال) **orogenesis** ، وهو مصطلح مستمد من الكلمة اليونانية **oros** بمعنى جبل و **genesis** بمعنى نشأة . وتمثل الصخور التى تكون الجبال دليلا مرثيا على القوى التضاغية الهائلة التى شوهت أجزاء كبيرة من القشرة الأرضية ، وتسببت بالتالى في رفع تلك الأجزاء إلى وضعها الحالى . وعلى الرغم من أن الطى هو أكثر علامات التشوه تميزاً ، إلا أن صدوع الدسر والتحول والنشاط النارى تكون دائماً متواجدة ولكن بدرجات مختلفة .

وعندما يذكر الجيولوجيون عمليات بناء الجبال ، فإنهم يشيرون إلى أحزمة الجبال الرئيسية الموضحة في شكل (1.18) ، وتشمل تلك المجموعة أحزمة الألب **Alps** والأورال **Urals** والهمالايا **Himalayas** والأبالاش **Appalachians** والكورديليرا الأمريكية **American Cordillera** . وتوجد أحزمة الجبال على كل قارة ، حيث تمتد لثلاث أو حتى آلاف الكيلومترات . وسوف نستعرض هنا أهم نتائج تشوه القشرة الأرضية ، ألا وهى أحزمة التجبل الرئيسية على الأرض .

faults تقع فوق تلك الحافة . وتتميز الحدود التى نشأت عن عمليات درز (التحام) وتصادم أقواس الجزر بوجود صخور مافية وفوقمافية والمعروفة بالأوفيرليتات **ophiolites** (شكل 4.18) . كما استمرت عملية التشوه داخل الرميخة **craton** الجديدة ، مما أدى إلى تكوّن صخور بركانية (متوسطة إلى فلسية) وصخور جرانيتية تداخلت في الأعياق ، بالإضافة إلى تكوّن رواسب المولاس (سحنة رسوبية تقع بين الرواسب البحرية والقارية ، وتكون غير مفروزة) . كما تكونت في الفترة منذ 630 - 550 مليون سنة مضت مجموعة من الصدوع أخذت اتجاه شمال غرب - جنوب شرق والمعروفة بنظام نجد **Najd System** ، مما أدى إلى زحزحة الجزء الشمالى من الرميخة العربية إلى اتجاه شمال - غرب .

III. أحزمة التجبل : بناء الجبال

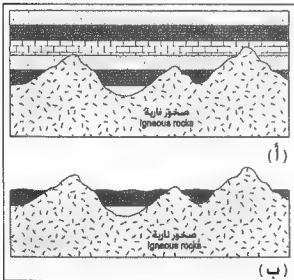
اجتذبت الجبال الموجودة فوق سطح الأرض انتباه الجيولوجيين أكثر مما اجتذبتهم المعالم الأرضية الأخرى . وقد تجمعت لدى العلماء خلال القرنين الماضيين كثير من المعلومات عن العمليات الداخلية التى تسبب نشأة هذه المعالم الأرضية المدهشة . وعندما يستخدم الجيولوجيون مصطلح جبل **mountain** فإنهم يشيرون إلى أى منطقة من اليابسة ترتفع بشكل ملحوظ عما حولها (300 متر على الأقل) . وتكون بعض الجبال معزولة ولها قمم واضحة ، ولكن من الشائع أن تتواجد الجبال كجزء من تتابع من المرتفعات الجبلية الممتدة طويلا ، وشديدة التقارب من بعضها ومتماثلة في الوضع والاتجاه والعمر والأصل ، تعرف بالمدود الجبلية (مفردها مد جبلى) **mountain ranges** . كما تُعرف منظومة الجبال **mountain system** بأنها منطقة جبلية تتكون من عدة مدود جبلية ، تربطها ملامح مشتركة في الشكل أو التركيب



شكل (5.18): جبال تكونت نتيجة للتصدع الكتل block-faulting، حيث حدثت الحركة فيها على امتداد الصدوع العادية normal faults وارتفعت بعض الكتل بالنسبة للمناطق المجاورة .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

أخدود (grabens). ويحد كتل التثقيب والأخاديد صدوعاً عادية متوازية من الجانبين. وقد أدت تعرية كتل التثقيب إلى تكون الملامح الطبوغرافية لسلاسل الجبال الحالية. وفي مصر، فقد نشأت بعض الجبال عن التصدع الكتل في منطقة خليج السويس.



شكل (6.18):

(أ) بلوتون من صخور نارية مقاومة للتعرية تداخل في صخور رسوبية.
(ب) تؤدي تعرية الصخور الرسوبية الضعيفة إلى كشف البلوتون وتكوين جبال صغيرة.

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

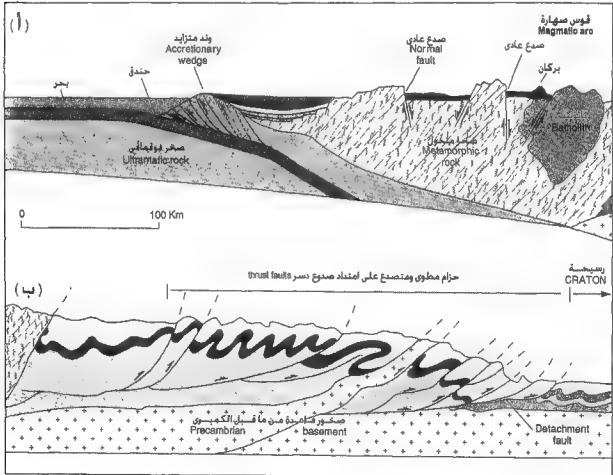
وتجدر الإشارة إلى أنه يوجد ببعض المناطق تضاريس جبلية تنشأ دون تشوه رئيسي في القشرة الأرضية. فقد تتقطع بعض الهضاب plateaus - وهي مناطق صخرية عالية مستوية القمة تقريباً - إلى تضاريس وعرة تشبه الجبال بسبب بعض عوامل التعرية. وعلى الرغم من أن تلك التضاريس المرتفعة تشبه الجبال تضاريسياً، إلا أنه ينقصها التراكيب المصاحبة لعمليات بناء الجبال. ومن أمثلة تلك الجبال أيضاً، تلك التي تتكون نتيجة التصدع الكتل block-faulting، والتي تشمل التحرك على صدوع عادية normal faults بحيث ترتفع كتلة أو أكثر بالنسبة للمساحات المجاورة لها (شكل 5.18). وتمثل منطقة بيزن أند رينج Basin and Range Province في غرب الولايات المتحدة مثلاً تقليدياً لتكون الجبال بسبب التصدع الكتل، حيث سُدت الأرض في اتجاه شرق - غرب، وتسميت قوى شد أدت إلى تكون صدوع تحد الكتل الأرضية في اتجاه شمال - جنوب. وقد أدت الحركة على امتداد تلك الصدوع إلى تكون كتل مرفوعة تسمى نتقاً (مفردها horsts) وكتل هابطة تسمى أخاديد (مفردها

وسلسلة الألب - الهيمالايا ، والتي تمتد من البحر الأبيض المتوسط عبر إيران إلى شمال الهند وإندونيسيا ، كذلك المناطق الجبلية في غرب المحيط الهادئ والتي تشمل أقواس الجزر الناضجة mature island arcs مثل اليابان والفلبين وسومطرة (شكل 1.18). وقد تكونت معظم هذه الأحزمة الجبلية الحديثة خلال المائة مليون سنة الأخيرة من عمر الأرض . وقد يكون بعضها قد بدأ في النمو ، بما فيها الهيمالايا ، منذ 40-50 مليون سنة مضت .
وبالإضافة إلى تلك الأحزمة الجبلية الحديثة ، فإنه توجد أحزمة جبلية أخرى منذ ما قبل الكمبري وحقب

كما قد تنشأ الجبال نتيجة تداخل بائوليثات مكونة من صخور بلوتونية (جوفية) مقاومة للتعرية في القشرة الأرضية انكشفت بعد أن رفعت الصخور ، وتم تعرية الصخور الرسوبية الضعيفة التي تعلوها (شكل 6.18).

أ. تراكيب الجبال

تكونت أحزمة الجبال خلال الزمن الجيولوجي المتأخر في عديد من مناطق العالم ، وهي تشمل الأحزمة الحديثة مثل الكوردلييرا الأمريكية ، والتي تمتد على الحافة الغربية لأمريكا من كيب هورن إلى ألاسكا ،



شكل (7.18):

(أ) قطاع عرضي في حزام جبلي نموذجي . وقد رسم القليل من الطبقات الرسوبية بفرض التبسيط .

(ب) امتداد لحزام الجبال إلى يمين الشكل (أ) .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

بمنجلة عملاقة تحرك فكها من البحر في اتجاه الأرض .
ويصاحب فترة التشوه في معظم أحزمة الجبال عمليات
نشاط بركاني مع متداخلات جرانيتية .

وتشمل المرحلة التالية في التشوه رسوبيات الماء
الضحل على الرفوف القارية . وتتكون تلك
الرسوبيات من الحجر الرمل والحجر الجيري والطفل .
وتشوه تلك الطبقات بالطي وبصدوع الدسر التي
تؤدي إلى انزلاق شرائح كبيرة من الصخور فوق
طبقات أحدث عمرا . ويكون التحول عادة منخفض
الرتبة . وتعرض مناطق التجبل بعد فترة من انتهاء
عمليات بناء الجبال إلى عملية رفع إقليمي . ويصاحب
تلك العملية عادة القليل من التشوه . وعندما ترتفع
الطبقات المشوهة عاليا ، تزايد عمليات التعرية مما
يؤدي إلى تشكيل الطبقات المشوهة لتأخذ الشكل
التضاريسي للجبال .

وقد تم خلال السنوات الماضية وضع عديد من
الفرضيات لتفسير كيف تتكون أحزمة الجبال الرئيسية .
وتقترح إحدى هذه الفرضيات أن الجبال عبارة عن
تجمعات في القشرة الأرضية نشأت أثناء تبرد كوكب
الأرض من حالتها الأولى شبه السائلة . فعندما فقدت
الأرض حرارتها فإنها انكمشت ونشأ بها التجمعات .
وتشبه تلك العملية ، ما يحدث من تجمعات عندما تحف
حبة برتقال ، ولكن هذه الفرضية لم تصمد طويلا أمام
الانتقادات التي وجهت إليها .

ومع ظهور نظرية تكتونية الألواح وضع نموذج
آخر لشرح عملية بناء الجبال . فطبقا لتلك النظرية فإن
بناء الجبال يحدث عند حدود الألواح المتقاربة ، حيث
تنشأ قوى تضاعف أفقية نتيجة تصادم الألواح ، مما
يؤدي إلى طي وتصدع وتحول التراكمات السميكة من
الرواسب المتكونة على امتداد حواف كتل الأرض .
وبالإضافة إلى ذلك ، يصبح الانصهار الجزئي للقشرة

الحياة القديمة (الباليوزوي) . وتحتفظ تلك الأحزمة
الجبلية بالملاحم التركيبية نفسها الموجودة في أحزمة
الجبال الحديثة ، على الرغم من تعرضها لعوامل التعرية
الشديدة . وتمثل جبال الأبالاش في شرق الولايات
المتحدة الأمريكية والأورال في الاتحاد السوفيتي
(السابق) تلك المجموعة القديمة . وتمتد في شرق مصر
سلسلة جبال البحر الأحمر ، والتي يرجع عمرها إلى ما
قبل الكامبري .

وعلى الرغم من أن أحزمة الجبال الرئيسية تختلف
من منطقة لأخرى في التفاصيل المميزة لكل منطقة ، إلا
أن كل أحزمة الجبال تتكون عموماً من حيزود متوازية
تقريباً من صخور رسوبية وبركانية مطوية ومتصدعة ،
كما أن بعض أجزائها قد تعرضت لعملية تحول شديدة
بالإضافة إلى تداخل بعض الأجسام النارية الأحدث
بها (شكل 7.18) . وقد تكونت الصخور الرسوبية في
معظم هذه الأحزمة نتيجة تراكم رواسب بحرية عميقة
يزيد سمكها في بعض الأحيان عن 15 كيلومترا ،
بالإضافة إلى رواسب الرف القاري الأقل سمكا .
وتكون معظم هذه الصخور الرسوبية المشوهة أقدم من
عمليات بناء الجبال . وتدل تلك الظواهر ، على أن هناك
فترة ممتدة من الترسيب الهادئ على الحافة القارية
أعقبها سلسلة أحداث عنيفة من التشوه .

وتدل الدراسة التفصيلية للمناطق الجبلية ، أن
عملية بناء الجبال تستغرق وقتا طويلا وتستغرق في
بعض الأحيان أكثر من 100 مليون سنة . وعلاوة على
ذلك ، فإن إعادة ترتيب الأحداث توضح أن التشوه
يبدأ عموماً من حافة القارة إلى الداخل ، بحيث
تتعرض الرواسب البحرية العميقة للتشوه أولا . وقد
تعرضت تلك الرواسب ، والتي تتكون من حجر رملي
ردى الفرز وفتات بركاني وطفل للطى الشديد
والتصدع والتحول الشديد ، كما لو أنها قد عُصرت

وتنشأ صهارات نتيجة الانصهار الجزئي للوح المندس وبعض صخور الوشاح الموجودة أعلاه. وتتصاعد تلك الصهارات لأعلى لتكوّن الجزء الناري من نظام القوس المتكون (شكل 8.18). وخلال فترة من النشاط البركاني وما يصاحبها من رفع للكتل النارية المتداخلة يزداد القوس المتكون في الحجم والارتفاع. وتؤدي زيادة ارتفاع القوس إلى زيادة معدل التعرية، وبالتالي زيادة كمية الرواسب التي تضاف إلى قاع البحر المجاور وإلى الحوض خلف - قوسى back-arc basin (المنطقة المحصورة بين الخندق المحيطي وقوس الجزر).

وبالإضافة إلى الرواسب الآتية من اليابسة، تُكشط رواسب الماء العميق من سطح اللوح المحيطي الهابط، وتتراكم تلك الرواسب أمام اللوح العلوي الراكب، وتكوّن ما يعرف بالوتد المتزايد accretionary wedge. وبمعنى آخر، فإن الوتد المتزايد هو كتلة كبيرة من الرواسب الوتدية الشكل، تتجمع فوق اللوح المحيطي المندس حيث تكشط تلك الرواسب من اللوح المحيطي المندس وتلتحم بكتلة القشرة الأرضية العلوية الراكبة. وتسبب قوى التضغوط الناشئة من الألواح المتقاربة أن يطوى الوتد المتزايد ومعه أجزاء من القشرة المحيطية التي قُصّت من اللوح الهابط والمعروفة بالأوفولييت بصورة معقدة ومقطوعة بعديد من صدوع الدسر. ويعتقد أن استمرار عملية الاندساس يؤدي إلى تكون وتدسميك من المواد المشوهة يمتد موازياً للجزء الناري من القوس وفي اتجاه البحر. وقد يؤدي النمو المستمر إلى بناء وتد متزايد يصبح في النهاية كبيراً لدرجة تكفي لأن يرتفع فوق مستوى سطح البحر.

وتتشوه وتحول الرواسب الموجودة في القوس البركاني ناحية الأرض. وقد يكون التحول في الوتد

المحيطية المندسة مصدراً للصحارة التي تتداخل وتشوه تلك الرواسب.

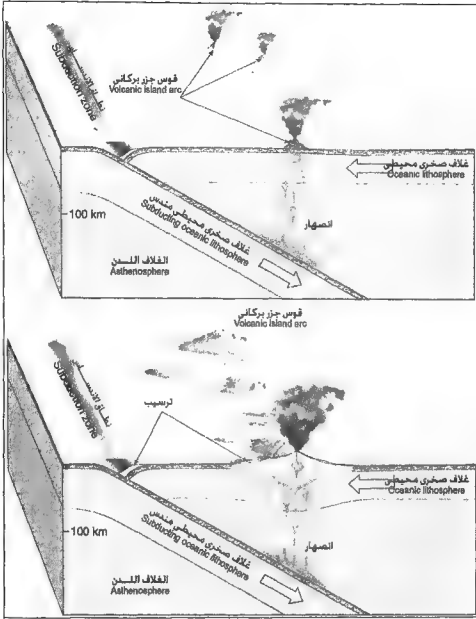
ب. عمليات بناء الجبال

تنصب معظم الدراسات التي تحاول فهم عمليات بناء الجبال على المناطق الموجودة بها تراكيب جبال قديمة، بالإضافة إلى المناطق التي يُظن أن عمليات التجبل مازالت قائمة بها. وتمثل نطاقات الاندساس النشطة مناطق ذات أهمية خاصة، حيث تتقارب أجزاء القشرة الأرضية، وتتكون أقواس بركانية عند معظم نطاقات الاندساس الحديثة. ويمثل هذا الوضع حزام التجبل الممتد حول المحيط الهادي والمعروف بالحزام حول الهادي circum-Pacific belt. وعلى الرغم من أن نشأة القوس البركاني لا تؤدي إلى تكون طوبوغرافية الجبل، إلا أن هذا النشاط يعتبر أحد مراحل تكون حزام جبال رئيسي.

وعندما يتصادم لوحان قاريان تنشأ قوى هائلة تؤدي إلى أن تفقد الأرض صلابتها وتشوه وتكسر بعدة طرق. وتمتص القشرة الأرضية معظم الحركة الناشئة عن التصادم عن طريق الطي الشديد والتصدع، خلال نطاق من التشوه الشديد يمتد لمئات الكيلومترات داخل القارة. وقد يحدث التصادم أيضاً بين كتلة قارية وكتلة من القشرة الأرضية من أي نوع، بما فيها جزر أرخبيل مثل جزر الألوشى أو بعض الكتل القارية الصغيرة مثل مدغشقر. وسوف نستعرض تلك المواقع من بناء الجبال في الأجزاء التالية.

1- بناء الجبال وأقواس الجزر: التجبل عند حدود الألواح المحيطية - المحيطية

تتكون أقواس الجزر البركانية volcanic island arcs من طراز الألوشى Aleutian type - عندما يتقارب لوحان محيطيان ويندس أحدهما تحت الآخر،



شكل (8.18): تطور قوس جزر بركاني volcanic island ara عند حد محيطي - محيطي متقارب من طراز الأليوش Aleutian - type. (After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

المتزايد نتيجة قوى الضغط الشديدة الناشئة من الألواح المتقاربة ، كما أن التحول قد يتم أيضاً بالقرب من القوس البركاني مصاحباً لتداخل الأجسام الصهارية الكبيرة . ولذلك ، فإن الصخور المتحولة الموجودة في الأقواس البركانية تحتوي على معادن مميزة للتحول المرتفع الحرارة.

وتؤدي هذه الأنشطة المختلفة إلى تكون قوس جزر ناضج mature island arc يشمل حزامي تجبل متوازنين تقريباً . ويتكون الجزء المواجه لليابسة من القوس البركاني من براكين وأجسام متداخلة كبيرة مختلطة مع صخور متحولة عند درجات حرارة مرتفعة. أما الحزام المواجه للبحر من القوس البركاني فهو الوند

وتبدأ المرحلة الأولى في تكون حزام جبلي طراز-الانديزي Andean type قبل تكون نطاق الإندساس. فخلال تلك الفترة فإن حافة القارة تكون حافة مستقرة margin passive. بمعنى أن الكتلة القارية توجد داخل اللوح بعيداً عن حافة اللوح. وتعتبر الكتلة القارية جزءاً من اللوح نفسه، مثلها مثل القشرة المحيطية المجاورة. ويمثل اليوم الساحل الشرقي للولايات المتحدة الأمريكية والحافة الغربية لأفريقيا مثلاً لحافة قارية مستقرة، حيث تراكمت عند تلك الحافة المستقرة، رواسب رف قاري تكون في النهاية وتدا سميكا من رواسب الماء الضحل والمكونة من الحجر الرمل والحجر الجيري والطفل (شكل 19.18)، وترسب تيارات العكر خلف الرف القاري رواسب العكر turbidites على المنحدر والمرتفع القاري. وعند نقطة معينة، تصبح الحافة القارية نشطة ويتكون نطاق اندساس، وتبدأ عملية التشوه (شكل 19.18 ب). ويعتبر الشاطئ الغربي لأمريكا الجنوبية مثلاً جيداً لتلك الحافة القارية النشطة. فعندما بدأت القارة العظمى بانجيا Pangaea منذ 200 مليون سنة في التكرس نتيجة للخصف على امتداد ما نعرفه اليوم بحدود وسط الأطلنطي، تحرك لوح أمريكا الجنوبية ناحية الغرب بعد انفصاله عن أفريقيا، بينما بدأ اللوح المحيطي المجاور للساحل الغربي لأمريكا الجنوبية (لوح نازكا) في الانحناء والاندساس تحت القارة، على امتداد خندق بيرو-شيلي (شكل 16.17). وقد تغيرت الحافة القارية من حافة مستقرة إلى حافة قارية نشطة.

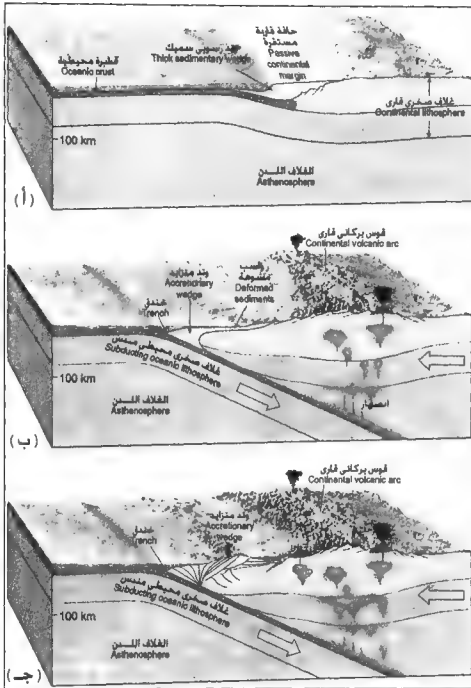
ويؤدي تقارب الكتلة القارية واندساس اللوح المحيطي إلى تشوه وتحول الحافة القارية. وبمجرد هبوط اللوح المحيطي إلى حوالي 100 كم، تصعد الصهارة الناتجة عن الانصهار الجزئي وتتداخل في الطبقات التي تعلوها، كما أنها تؤدي إلى تشوه تلك الطبقات (شكل

التزايد وهو يتكون من رواسب متحولة ومطوية ومتصدعة وفئات بركاني، وتحتوى على معادن تميز التحول بالضغط المرتفع مثل معدن الجلوكوفين.

وقد تحقق الجيولوجيون حديثاً من أهمية أقواس الجزر في عملية بناء الجبال. وهناك الآن اتفاق عام على أن العمليات التي تحدث في أقواس الجزر الحديثة تمثل إحدى مراحل تكون أحزمة الجبال الرئيسية على الأرض. وحيث إن أقواس الجزر تُحْمَل بواسطة الألواح المحيطية المتحركة، فإنه من الممكن أن يصطدم قوسان ويلتصحا ببعضهما (تعرف عملية الالتحام بالدرز suturing) ليكونا كتلة كبيرة من القشرة الأرضية. كما تنمو وتزداد أقواس الجزر لتصل إلى كتل في حجم القارات، وتشارك تلك الكتل في تكوين حزام جبلي، مثل حزام جبال الألبايش.

2- بناء الجبال على امتداد الحواف القارية: التجبل عند حدود الألواح المحيطية - القارية

تتضمن عملية بناء الجبال على الحواف القارية تقارب لوح محيطي مع لوح آخر تشتمل مقدمته على قشرة قارية مثل جبال الألب في أوروبا وجبال الأنديز في غرب أمريكا الجنوبية. وتشمل منظومات جبال الأنديز على أعلى قمم جبلية في الأمريكتين، حيث وصل عديد من تلك القمم إلى ارتفاع يزيد عن 6000 متر. ويضم الأنديز أيضاً براكين نشطة، بالإضافة إلى أن الجزء الغربي من أمريكا الجنوبية هو جزء نشيط للغاية من حزام الزلازل حول المحيط الهادئ. وعلاوة على ذلك، يعتبر خندق بيرو-شيلي الذي يقع عند الساحل الغربي لأمريكا الجنوبية أحد أكبر الخنادق المحيطية على الأرض. وبسبب هذا النوع من التقارب المحيطي - القاري تراكيب تشبه تلك الموجودة أثناء نمو وتكون قوس جزر بركاني.



شكل (9.18): تمثيل على امتداد نطاق اندساس من طراز الأنديزي Andean-type

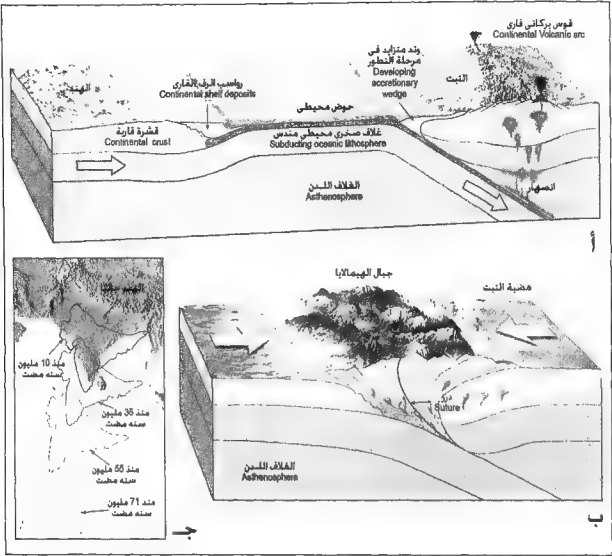
(أ) حافة قارية مستقرة يغطيها وتد سميك من الرواسب

(ب) تقارب ألواح ينشأ عنه نطاق اندساس، وانصهار جزئي ينشأ عنه نمو قوس بركاني قاري.

(ج) استمرار التقارب والنشاط الناري يؤدي لاحقاً إلى نشوء وزيادة سمك القشرة، مما يؤدي إلى رفع أحزمة الجبال ونمو الودود التتامي

accretion wedge

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).



شكل (10.18): هجرة الهند إلى الشمال واصطدامها بلوح أوروسيا

(أ) ألواح متقاربة يتكون بينها نطاق اندساس، حيث يحدث انصهار جزئي للوح المحيطي المندس ويتكون قوس بركاني. أما الرواسب التي كشطت من اللوح المندس فقد أضفيت إلى الوتد المتزايد (اللتامي) **accretionary wedge**.

(ب) وأخيراً تصادمت الكتلتان، وحدث التشوه وُفِع الوتد المتزايد (اللتامي) ورواسب الرف القاري، كما دفعت أجزاء من قشرة الهند فوق اللوح الهندي.

(ج) وضع الهند بالنسبة للوح أوروسيا في مختلف الأزمنة.

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

كشطت من القشرة المحيطية والوشاح والمساة بالآفيوليت، (شكل 9.18 ب). وقد يؤدي استمرار وامتداد عملية الاندساس إلى بناء وتدد متزايد كبير لدرجة أنه يبرز فوق مستوى سطح البحر (شكل 9.18 ج).

9.18 ب). وتلتحم الرواسب الآتية من اليابسة وتلك التي كشطت من اللوح المندس بجانب الكتلة القارية على امتداد الخندق أثناء تكون القوس البركاني **volcanic arc**. ويطلق مصطلح وتدد متزايد **accretionary wedge** على هذا التراكم من الصخور الرسوبية والمتحولة مع بعض الأجزاء التي

الكيلومترات في القارة . ويسبب التصدع في تكسر القشرة إلى عديد من فرش الدسر **thrust sheets** يصل سمكها إلى حوالى 20 كم ، تتكدس فوق بعضها البعض على امتداد أسطح صدوع الدسر شبه الأفقية . كما تشوه غالبا فرش الدسر نفسها وتعرض للتحويل ، كما تنتزع رواسب الرف القارى الوتدية من صخور القاعدة التى ترسبت عليها وتدفع على أسطح الدسر داخل الأرض . ويوضح شكل (10.18) مثالا لبناء الجبال نتيجة التصادم القارى عندما اصطدمت الهند مع آسيا منذ 40-50 مليون سنة . وقد انفصلت الهند عن القارة القطبية الجنوبية (أنتاركتيكا) قبل هذا الوقت ، والتي كانت جزءاً منها ثم تحركت عدة آلاف من الكيلومترات ناحية الشمال قبل أن يحدث التصادم (شكل 10.18) . وقد تكونت جبال الهيمالايا ومرتفعات التبت نتيجة هذا التصادم .

وعلى الرغم من أن معظم القشرة المحيطية التى كانت تفصل الهند عن آسيا قبل التصادم قد اندست ، إلا أن بعضها قد ضغط مع الرسوبيات البحرية . ويمكن أن تتواجد الآن تلك المواد مرتفعة عالياً فوق مستوى سطح البحر . ويعتقد أن اللوح المحيطى الهندس قد انفصل عن اللوح القارى الصلب واستمر في مساره تحت الكتلة القارية بعد هذا التصادم .

ويعتقد أن مركز الانتشار الذى دفع الهند إلى الشمال مازال نشيطاً ، وأنها لازالت مستمرة في تحركها ناحية آسيا . وقد قطعت الهند منذ تصادمها مع آسيا حوالى 2000 كم في آسيا على امتداد صدوع دسر . وتحرك الهند حالياً نحو الشمال بمعدل حوالى 5 سم كل عام . ويدل عديد من الزلازل الشديدة المسجلة في الصين ومنغوليا على هذا التحرك .

وتتكون أحزمة الجبال طراز-الأنديزى ، مثلها مثل أقواس الجزر الناضجة ، من نطاقين متوازيين تقريباً . النطاق الأول ويشمل الجزء الواقع ناحية اليابسة ، ويحتوى على القوس البركانى المكون من البراكين الأنديزيتية وأجسام متداخلة فلسية كبيرة مختلطة مع صخور متحولة عند درجات حرارة عالية . أما الحزام الواقع ناحية البحر من القوس البركانى فهو الوند المتزايد والمتكون من رسوبيات وفتات بركانى مطوى ومتصدع ومتحول .

ويوجد مثال آخر على أحزمة التجبل طراز-الأنديزى من الصحراء الشرقية المصرية ، وتشمل سلسلة الجبال الممتدة موازية للبحر الأحمر تقريباً . وقد تكون ذلك الحزام الجبلى نتيجة اندساس لوح محيطى تحت الحافة الغربية للوح أفريقيا القارى (شكل 26.17) .

3- بناء الجبال نتيجة التصادم القارى: التجبل عند حدود الألواح القارية - القارية

ناقشنا في الجزء السابق تكون أحزمة الجبال عندما تشمل الحافة المتقدمة لأحد الألواح المتقاربة قشرة قارية . ومع ذلك ، فمن الممكن أن يحمل كل من اللوحين المتصادمين قشرة قارية . ونظراً لكون الغلاف الصخري للمقارات أخف من أن يغوص ويندس ، فإن التصادم يحدث في النهاية بين الكتلتين القاريتين . وجدير بالملاحظة أن قوى التصادم بين الكتل القارية تكون كبيرة لدرجة أن القشرة القارية تفقد صلابتها وتشوه وتتكسر بعده طرق . وتمتص القشرة القارية معظم حركة التصادم عن طريق الطى الشديد والتصدع في نطاق تشوه شديد يمتد مئات

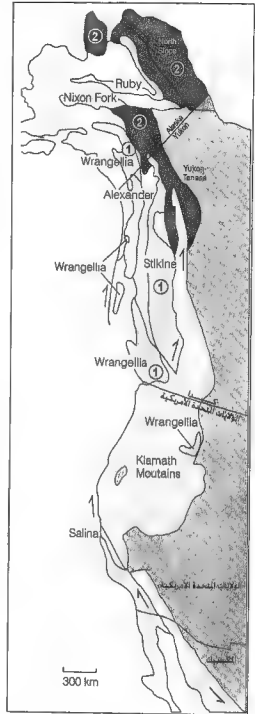
ويعتقد أنه حدث تصادم مشابه ، ولكنه أقدم كثيراً ، حينما اصطدمت القارة الأوربية مع قارة آسيا لتتكون جبال الأورال Ural Mountains التى تمتد في اتجاه شمالى - جنوبى في الاتحاد السوفيتى السابق . وقبل ظهور نظرية تكتونية الألواح ، وجد الجيولوجيون صعوبة في تفسير وجود سلاسل جبال داخل القارات ، وكيف يمكن أن ترسب آلاف الأمتار من الرواسب البحرية وتشوه كثيراً في وسط كتلة قارية كبيرة .

وهناك أحزمة جبال أخرى يظهر أنها تكونت نتيجة تصادمات قارية مثل جبال الألب والأبالاش . ويعتقد أن جبال الألب قد تكونت نتيجة تصادم بين أفريقيا وأوروبا عند غلق البحر التيثيز Tethys Sea . كما يوجد أيضاً اللوح العربى في غرب جبال الهيمالايا الذى يتصادم مع آسيا على امتداد سلسلة جبال زاغروس Zagros Mountains في إيران .

4- بناء الجبال وتكتونية الألواح الصغيرة

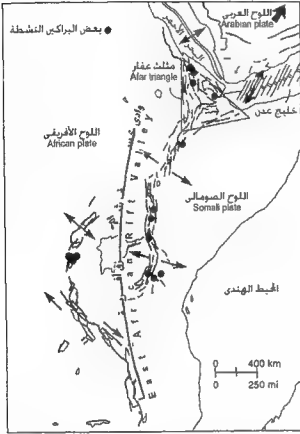
أوضحت نظرية تكتونية الألواح عند بداية ظهورها أن هناك ميكانيكيتين لتفسير نشأة الجبال (التجبل) ، الأولى وهى التصادمات القارية التى اقترحت لشرح بعض منظومات الجبال مثل الألب والهيمالايا والأبالاش والأورال . أما الثانية فهى نشأة الجبال المصاحبة لاندساس لوح محيطى ، مثل منظومة جبال الأنديز ، والتى كان يعتقد أنها سبب نشأة عديد من منظومات الجبال حول المحيط الهادئ .

وقد أوضحت البحوث الحديثة أن هناك ميكانيكية أخرى لشرح نشأة الجبال . فقد اكتشف الجيولوجيون خلال الفترة من عام 1970م وحتى عام 1980م أن هناك أجزاء عديدة من المنظومات الجبلية تتكون من كتل ملتصحة صغيرة (تتمدد لمئات الكيلومترات) من الغلاف الصخري ، يدل تاريخها الجيولوجى على أنها مختلفة عن الكتل المحيطة ، تعرف بكتل الألواح الصغيرة microplate terranes . وتختلف تلك



شكل (11.18). بعض كتل الغلاف الصخري الملتصحة والمساة بالألواح الصغيرة microplates ، والتى تكون الحافة الغربية لأمريكا الشمالية . ومن المحتمل أن بعض الكتل (موضحة بالرقم 1) قد نشأت كأجزاء من قارات غير قارة أمريكا الشمالية ، بينما انزاحت بعض الكتل الأخرى (موضحة بالرقم 2) كأجزاء من قارة أمريكا الشمالية نفسها .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).



شكل (12.18): يتمزق شمال شرق أفريقيا بثلاثة مراكز انتشار، تلتقي في اتصال ثلاثي الأذرع triple junction في مثلث عفار. (After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

ولكن ما طبيعة تلك الأجزاء الصغيرة من الغلاف الصخري، وأين نشأت؟ ويعتقد بعض الباحثين أن بعض تلك الكتل قد تكون عبارة عن قارات صغيرة مشابهة في طبيعتها لجزيرة مدغشقر الحالية. وقد يكون بعضها عبارة عن أقواس جزر، مثل اليابان والفلبين وجزر الألوشى، والتي تمتد حالياً في المحيط الهادى. وبالإضافة إلى ذلك، فقد يوجد البعض الآخر تحت مستوى سطح البحر، وتمثلها حالياً الأرضفة المغمورة، والتي ترتفع عالياً فوق سطح الماء على الناحية الغربية من المحيط الهادى.

وتقترح أكثر وجهات النظر قبولاً اليوم، أن الألواح المحيطية تتحرك حاملة أقواس الجزر والقارات الصغيرة إلى نطاق اندساس، حيث تُكشط الأجزاء

الكتل تماماً في محتواها الحفري والاتجاهات التركيبية وخصائص المغناطيسية القديمة عن صخور منظومة الجبال المحيطة. وقد دفع هذا الاختلاف كثيراً من الجيولوجيين للاعتقاد أن تلك الكتل تكونت في مكان آخر ثم حملت لمسافات كبيرة كأجزاء من ألواح أخرى حتى اصطدمت مع ألواح صغيرة أخرى أو قارات. ولذلك تعرف أحياناً تلك الألواح الصغيرة بالكتل المزاحة displaced terranes أو الكتل الدخيلة exotic terranes. ويجب ألا نخلط بين مصطلح terrane وكلمة terrain والتي تعنى منطقة أو تضاريس أرض ما.

وتشير الأدلة الجيولوجية أن أكثر من 25٪ من ساحل المحيط الهادى الممتد غرب أمريكا الشمالية من الأسكا إلى باها بكاليفورنيا يتكون من ألواح صغيرة ملتصحة. وتكون الألواح الصغيرة المتزايدة من أقواس جزر بركانية وحيود محيطية وجبال بحرية وكتل صغيرة من القارات، والتي كُشِطت ولُحِمت في حافة القارة أثناء اندساس اللوح المحيطي الذي حملها تحت القارة. ويقدر أنه أضيف أكثر من 100 لوح صغير مختلفة الأحجام إلى الحافة الغربية لأمريكا الشمالية خلال المائتي مليون سنة الماضية (شكل 11.18).

وتوجد معظم الألواح الصغيرة المعروفة في سلاسل جبال المنطقة الساحلية للمحيط الهادى-أمريكا الشمالية، إلا أنه يعتقد أنه يوجد عدد من تلك الألواح الصغيرة في السلاسل الجبلية الأخرى أيضاً، ولكن ليس من السهل تعرف تلك الألواح الصغيرة في المنظومات الجبلية الأقدم، مثل الأبالاش، بسبب التشوه والتعرية الشديدة. ومع ذلك، فقد تم تمييز حوالي 12 لوحاً صغيراً في الأبالاش، إلا أنه من الصعوبة بمكان تمييز حدودها. وتقدم تكتونية الألواح الصغيرة نظرية جديدة للأرض تساعد في فهم التاريخ الجيولوجي للقارات.

الحديثة، وتمتد جنوباً من البحر الأحمر وخليج عدن عبر القارة الأفريقية (شكل 12.18). ووديان الخسف والأحواض الكبيرة التي يشغلها البحر الأحمر وخليج عدن هي أخاديد grabens تكونت نتيجة شد وكسر القشرة القارية. ووداي الخسف rift valley هو منخفض ضيق وطويل يحده من كل جانب صدع واحد أو أكثر من الصدوع العادية normal faults. وينشأ وادي الخسف عن قوى شد، حيث يبدو أن كتلة قد سقطت بين كتلتين شدتا من جانبيها (شكل 17.23). وعندما تتكون نطاقات الخسف، فإنها تبدأ غالباً عند حدود اللوح كأنها أخاديد لها ثلاثة أذرع تعرف بالملتقى الثلاثي triple junction (شكل 13.18). وقد لاحظ الجيولوجيون قبل ظهور نظرية تكتونية الألواح أن القشرة القارية عند الأخاديد ثلاثية الأذرع three armed grabens ترتفع وتتحذب على هيئة قباب. ويبدو أن هذا القباب، وفي ضوء نظرية تكتونية

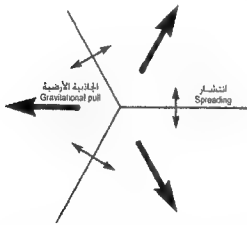
العليا السميكة من اللوح الهابط وتُدفع على امتداد صدوع دسر thrust fault على هيئة فرش رقيقة نسبياً فوق كتلة القارة المجاورة. وتزيد هذه المادة التي أضيفت حديثاً من عرض القارة، وقد تراكب فوق كتلة القارة، وتزاح داخل القارة إذا حدث تصادم بكتل أخرى إضافية. وعلاوة على ذلك، فإن هناك أجزاء من القشرة القارية تزاح باستمرار على امتداد صدوع نافلة transform faults، حيث يمكن أن تصطدم وتلتاحم بكتل الغلاف الصخري الأخرى. ومثال على تلك العملية، ما يحدث في غرب لوح أمريكا الشمالية، حيث يزاح جزء من كاليفورنيا وشبه جزيرة باها في اتجاه شمال-غرب على امتداد صدع سان أندرياس، ومع مرور وقت كاف، قد تلتحم تلك القشرة القارية بالأسكا.

IV. خسف القارات

تسبب قوى تكتونية الألواح في تغيير القشرة المافية (البازلتية) الرقيقة تحت قيعان المحيطات، وكذلك القشرة الفلسية السميكة للقارات. وكما ذكرنا في فصل تكتونية الألواح، فإن نطاقات الانتشار spreading zones تتواجد غالباً في منتصف أحواض المحيطات، حيث يتكون النطاق الصخري المحيطي وينتشر في كل من الجانبين على امتداد حيود وسط المحيط. وبالمثل، فإن القشرة القارية يمكن أن تنفصل إلى أجزاء، حيث يتكون محيط جديد بين الجزئين القاريين المتبقين. والقشرة القارية لا تنكسر إلى أجزاء بسهولة، حيث إن سمكها يبلغ خمسة أمثال القشرة المحيطية. وفي الحقيقة فإن الخسف يبدأ في التكون بكسر القارة. وتقدم قارة أفريقيا والبحار المجاورة لها مثلاً جيداً على الخسف القاري، والذي مازال في طور التكوين حتى الآن.

أ. الخسف ثلاثي الأذرع والنقاط الساخنة

توجد على حافة قارة أفريقيا منظومة من وديان الخسف rift valleys تكونت خلال حقب الحياة



شكل (13.18): شكل توضيحي للاتصال ثلاثي الأذرع triple junction والمكون من ثلاثة مراكز انتشار حديثة حيث تتركز الحرارة في الوشاح وتصدد لأعلى في هيئة بلوم صهاري، مما يؤدي إلى تحذب وتقيب الغلاف الصخري فوقها وتكسره إلى نظام شعاعي مكون من ثلاثة أذرع يشغل كل منها خسفاً rift. وتعمل الجاذبية الأرضية على تمزيق القبة وبده عملية انتشار في كل خسف.

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

حيث تنشأ باستمرار قشرة محيطية جديدة على قاع حوض محيطي يتسع باستمرار (شكل 17، 23).

وتمثل وديان الحسف في شرق أفريقيا المرحلة الابتدائية في تكسر قارة. كما تضم وديان الحسف بحيرات كبيرة مثل بحيرة تنجانيقا. ويصاحب وديان الحسف براكين مافية ربما صعدت من الوشاح. وتمثل الجبال البركانية الكبيرة مثل جبل كليمنجارو Kilmanjaro وجبل كينيا Mount Kenya النشاط البركاني الكبير الذي يعتقد أنه يصاحب الحسف القاري. ولم تنشأ وديان الحسف إلا منذ حين الميوسين المبكر (أقل من 20 مليون سنة مضت). وإذا استمر نشاط وديان الحسف في أفريقيا فإن شرق أفريقيا سينفصل في النهاية من كتلة القارة الرئيسية بنفس الطريقة التي انفصلت بها شبه الجزيرة العربية منذ 25 مليون سنة. ومع ذلك، فليس بالضرورة أن تكون كل وديان الحسف مراكز انتشار كاملة حتى النهاية. ولم يعرف السبب بعد في استمرار نشاط بعض وديان الحسف حتى النهاية، وتوقف بعضها في مراحل معينة.

V - الحواف المستقرة للقارات

عندما يستمر الحسف القاري دون توقف، فإن القارة تنقسم إلى كتلتين، ويتكون محيط ضيق بينهما. وتحرك في النهاية الحافتان القاريتان الجديدتان بعيدا عن نطاق الانتشار. وتُعلمر تلك الحواف بالبحار الضحلة نتيجة الحركة الأفقية الجانبية بعيدا عن محور جيود وسط المحيط، ولأسفل على منحدر سطح الغلاف اللدن (الاستينوسفير) إلى مناطق ينخفض فيها السريان الحراري heat flow. وهكذا فإن حدود القارات التي كانت نشطة تكتونيا حينما كانت قريبة إلى نطاق الانتشار، أصبحت حدودا غير نشطة أي حواف مستقرة، وعندما تهبط تلك المساحات من القشرة القارية غير النشطة تكتونيا تحت مستوى سطح البحر،

الألواح، يعكس وجود نقطة ساخنة hot spot. وعند مثلث عفار Afar Triangle بجيبوتي يمثل البحر الأحمر وخليج عدن والنهاية الشمالية لوديان الحسف الأفريقية ملتقى ثلاثي (شكل 18، 12). وتواجد هذه الملتقيات كمعالم شائعة في القشرة الأرضية، حيث يتواجد أكثر من نوع من حدود الألواح عند الملتقى الثلاثي.

ويستمر الحسف عادة في ذراعين من أذرع الحسف ثلاثي الأذرع، بينما يصبح الذراع الثالث خفيفاً خاملاً failed rift. وقبل أن يتوقف النشاط على امتداد هذا الذراع الخاملاً، فإنه يكون أخذوداً أو منظومة من الأخاديد تمتد داخل اليابسة من حافة القارة الجديدة التي كوّنها الذراعان الآخران. ويصبح الذراع الثالث (أو الخامل) منخفضاً ويمتلأ بالرواسب، كما يصبح مستقراً تدريجياً ويدفن وتنساب به بعض الأنهار الكبيرة، مثل الميسيسي والراين والأمازون. وقد أطلق عليه الجيولوجيون الروس مصطلح أولاكوجين aulacogen. وتحتوي عادة منخفضات الأولاكوجين على موارد بترولية هامة نتيجة التراكم السريع للرواسب السمكية التي تحتوى على رواسب غنية بالمواد العضوية، وقد تتكون أيضاً بعض رواسب الحامات في الأماكن التي تصعد فيها المحاليل الساخنة على امتداد الصدوع التي تحد تلك المنخفضات.

ب - المعالم الجيولوجية لوديان الحسف القارية

يتكون كل وادي حسف من كتلة أرضية طويلة ضيقة انخفضت نتيجة التصدع. ويستطيل وادي الحسف ويزيد في العمق بسبب استمرار عملية الانتشار والشد حتى يصل في النهاية إلى المحيط. وفي هذه الحالة فإن الوادي يصبح بحراً ضيقاً وطويلاً مع وجود مخرج إلى المحيط، كما هو الحال في البحر الأحمر (شكل 10، 23). ويستمر نطاق الحسف كموضع للنشاط الناري،

وعلى الرغم من ارتباط عديد من الحركات الرأسية بالتجبل، إلا أن الحركات الإيروجنية تكون بطيئة ومتقطعة وتؤثر عادة على مساحات شاسعة، أى أن تأثيرها إقليمي، ولا تتعرض فيها الصخور لعمليات طوى أو تصدع شديد. وهناك شواهد عديدة تدل على حدوث عملية المبروط البطيء والمستمر للقشرة الأرضية أثناء عملية الترسيب؛ فالحفريات النباتية الموجودة في رواسب الفحم والتي نجدها الآن في المناجم في عمق الأرض تدلنا على أن الأشجار قد نمت في الأزمنة الجيولوجية السابقة فوق سطح الأرض وهى الآن مدفونة. كما تقدم التتابعات السمكية من الرواسب التي تراكمت على قاع البحر ودفنت لمئات أو آلاف الأمتار تحت قاع البحر الدليل على أن تلك الرواسب قد ارتفعت مئات أو آلاف الأمتار فوق سطح البحر حيث نجدها الآن. ويعزى رفع تلك الرواسب إلى الوضع الحالي فوق سطح البحر إلى الارتفاع البطيء دون حدوث أى تشوه للرواسب.

ولا يستطيع الجيولوجيون حتى الآن تقديم تفسير شامل لمعظم الحركات البطيئة والإقليمية الإيروجنية، ولكن وضعت بعض الفرضيات لشرح بعض تلك الحركات (شكل 14.18)، حيث يمثل رفع فنلندا وإسكندنافيا وشواطئ شبال كندا المرفوعة عملية استعادة القشرة الأرضية لوضعها الأصلي ببطء بعد إزالة الحمل الجليدي الذي تسبب في انخفاضها (شكل 14.18 أ). ويعتقد أن الأحواض العميقة على جانبي حيو وسط المحيط ترجع إلى تبرد وانكماش اللوح المحيطي الجليدي (شكل 14.18 ب). وقد يتسبب تسخين الغلاف الصخري من أسفل في دفعه لأعلى وتقليل سمكه (شكل 14.18 ج). وقد تؤدي بعض حركات الوشاح إلى شد الغلاف الصخري الموجود أعلاه وجعله أكثر رقة دون كسر اللوح. وقد يفسر

وتراكم الرواسب على امتداد الرفوف القارية الضحلة. وتمثل الحدود الغربية للوح الأفريقي مثالا للحافة القارية المستقرة.

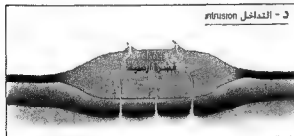
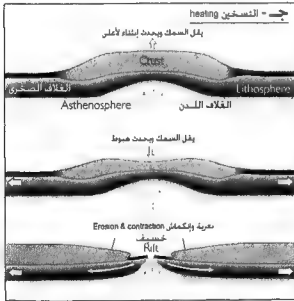
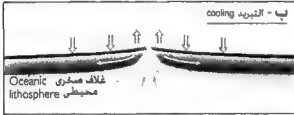
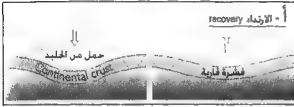
وتعرف الحواف المستقرة **passive margins** للقرارات بأنها الحواف التي توجد داخل اللوح بعيدا عن حافته، حيث تعتبر الكتلة القارية جزءا من اللوح نفسه، مثل القشرة المحيطية المجاورة. وتسمى تلك الحواف بالمستقرة أى الهادئة، حيث لا يوجد نشاط بركاني، كما تكون الزلازل قليلة ومتباعدة. وعلى العكس من ذلك، فإن الحواف النشطة **active margins** تكون مصاحبة لنطاقات اندساس وصدوع نافلة، مما يعطى لتلك الحواف القارية الضيقة والمشوهة تكتونيا اسمها. كما تعتبر الحواف النشطة مواضع لنشأة الجبال.

وهكذا، فقد هاجرت حواف الأطلسنطى المتاخمة للولايات المتحدة والتكتونة حديثا بعيدا عن أفريقيا بعد أن تكسرت قارة البانجيا **Pangea** مبكرا في حقبة الحياة الوسطى (الميزوزوي)، كما أخذت الرواسب في التراكم لتصل إلى سمك كبير. وقد استمرت تلك الحافة المستقرة في المبروط تحت وزن الرواسب المضافة، لتفسح المجال لرواسب أخرى يمكن إضافتها.

VI - الحركات الرأسية الإقليمية

تركزت مناقشتنا لحركات القشرة الأرضية على التجبل (بناء الجبال) الذي ينشأ نتيجة لتصادم الألواح. ويتضمن التشوه نتيجة التضاضط بالطي والتصدع بالدرس وتداخل الصهارة والبركنة والتحول. ومع ذلك ففي جميع أنحاء العالم، تسجل تتابعات الصخور الرسوبية نوعا آخر من التاريخ الجيولوجي هو الحركات البطيئة والتدريجىة للقشرة الأرضية لأعلى ولأسفل دون تعرض تلك الصخور لتشوه ملحوظ، وتعرف تلك الحركات بالإيروجنى **epeirogeny**.

هبوط حافة القارة بعد الخسف . ويرجع هذا الهبوط إلى انكماش القشرة أثناء تبرد الحواف وتعريضها أثناء تراجعها من الخسف . كما قد يؤدي تداخل الصهارة إلى زيادة سمك القشرة القارية ويسبب رفعها إلى أعلى (شكل 14.18 د).



ذلك هبوط بعض الأحواض في القارات . وقد يؤدي استمرار الشد وحدوث خسف إلى تكون كتلتين قاريتين يفصل بينهما محيط في طور التكوين . ويدل تكون الأحواض المثلثة بالرواسب على الحواف القارية (مثل تلك الموجودة على الشواطئ شرق الأمريكتين والشواطئ الغربية لأوروبا وأفريقيا) في

شكل (14.18): بعض الميكانيكيات الافتراضية لتفسير الحركة الرأسية (لا يوجد مقياس رسم)
(أ) يؤدي حمل جليد المثلثة glacier إلى تغمر القشرة الأرضية ، بينما يرتفع القاع ببطء عند إزالة الجليد .

(ب) يتكون الغلاف الصخري المحيطي عند حيود وسط المحيط mid - ocean ridge ، ثم ترفع قمة الحيد ويهبط قاع البحر عندما يبرد اللوح ويتقلص .

(ج) يرق الغلاف الصخري القاري ويثنى لأعلى بسبب التسخين ، كما قد يرق الغلاف الصخري القاري بسبب شدده ومطه عندما يندس ، ويتكون حوض ترسيبي فوق القارة ، فإذا تصدع اللوح الصخري القاري تكونت قارتان وينشأ بينهما محيط يأخذ في النمو التدريجي . وتآكل حواف القارات المتراجعة بسبب التعرية من أعلى ، بينما تبرد وتقلص لتتكون حواف قارية مغمورة .

(د) قد يؤدي تداخل الصهارة magma إلى زيادة سمك القشرة الأرضية وسبب رفعها إلى أعلى .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

4. ولا تقتصر الحركة الرأسية الأقليمية على الأزمنة الجيولوجية الماضية فحسب ، بل لازالت تعمل حتى الآن مثل بقية الحركات التكتونية الأخرى ؛ فمدينة فينسيا نهبط حالياً ببطء في البحر الإدرياتيكي بمعدل حوالي 4 مم كل عام . ويرجع السبب الرئيس لعملية الهبوط إلى أسباب تكتونية ، بالإضافة إلى أن سحب الماء والغاز الطبيعي من الرواسب قد عجل في عملية الهبوط . ورغم توقف عملية سحب الغاز والماء في فينسيا ، إلا أن الهبوط التكتوني مازال مستمراً.

الملخص

1. يمكن تقسيم القشرة القارية في معظم القارات إلى مناطق تشوهات خلال العصور الجيولوجية المختلفة. فتوجد داخل معظم القارات صخور مسطحة تقريباً تمتد لمساحات شاسعة ومستقرة تكتونياً منذ نشوئها في ما قبل الكامبري ، تعرف بالسيخات ، كما تعرف المناطق المنكشفة من السيخات بالدروع. ويوجد خارج هذه المناطق القديمة أحزمة جبال نشيطة ، أحدث عمراً ، تكونت نتيجة تشوهات مرتبطة بحركات الألواح التكتونية.
2. تتكون الجبال عموماً بعدة طرق ، حيث يوجد في بعضها طى وتصدع ، بينما لا يوجد في البعض الآخر أى تشوهات ملحوظة . وتتكون أنظمة الجبال من عدة مدود جبلية تنتج من التشوه المرتبط بحركة الألواح.
3. تشمل عملية بناء الجبال والمعروفة بالتجبل الطى والتصدع والنشاط النارى والتحول . وتحدث معظم عمليات بناء الجبال حينما تقارب الألواح ويندس لوح تحت آخر أو عندما يصطدم لوحان قاريان.
4. تتميز عمليات بناء الجبال التى تقع عند حدود الألواح المحيطية - المحيطية ، بوجود قوس جزر بركانى من طراز الألبوشى وتشوه ونشاط نارى وتحول للصخور. ويؤدى تراكم الرواسب أمام اللوح الرابك إلى تكون وتد متزايد يلتحم بكتلة القشرة الأرضية العلوية الرابكة . وتؤدى عملية الاندساس المستمرة إلى تكون قوس جزر ناضج يشمل حزامى تجبل متوازيين تقريباً: حزام تجبل يضم البراكين والأجسام المتداخلة الكبيرة المختلطة مع الصخور المتحولة مواجه للأرض ، وحزام آخر مواجه للبحر يشمل الوتد المتنامى.
5. يؤدى اندساس لوح محيطى تحت لوح قارى إلى بناء الجبال أيضاً ، مثل جبال الألب في أوروبا وجبال الأنديز في غرب أمريكا الجنوبية . وتعرف مثل تلك الأحزمة بأنها أحزمة جبال - طراز الأنديز. ويؤدى استمرار عملية الاندساس إلى تكون نطاقين متوازيين تقريباً من أحزمة الجبال: الأول ويشمل القوس البركانى المتكون من البراكين الأنديزيتية ومتداخلات جرانيتية كبيرة تحت القوس البركانى وصخور متحولة ، أما الحزام الواقع في مواجهة البحر من القوس البركانى فيشمل الوتد المتزايد .
6. توجد بعض منظومات الجبال ، مثل جبال الهيايا وجبال الأورال ، داخل القارات بعيداً عن حدود الألواح الحالية ، وهى تتكون عندما يصطدم لوحان قاريان ببعضهما ويلتحمان .
7. تحقق الجيولوجيون الآن من أن بناء الجبال يحدث أيضاً عندما يصطدم لوح صغير بقارة ، مثل بعض كتل الغلاف الصخرى الملتحمة بالخافة الغربية لأمريكا الشمالية .

لتكون نظام خسف ثلاثى الأذرع. وقد يؤدي اتصال بعض أذرع الخسف مع بعضها لتكون كسر يتقطع خلال القارة كلها. ويميز بداية التكسر القاري بالتصدع الكتلي وترسيب تتابعات سميكة من الرواسب الفتاتية السيليكاتية والمتخثرات.

11. قد تؤدي القوى التكتونية في القشرة الأرضية إلى تشوه مساحات كبيرة من القارات. وقد تكون بعض الحركات الإقليمية بسيطة ورأسية إلى أعلى وإلى أسفل دون تشوه شديد للصخور (إيروجيني)، ومن أمثلتها هضبة كولورادو ورفع إسكندنافيا ووسط كندا بعد انصهار المثالج.

8. تنمو القارات نتيجة تتابع من عمليات بناء الجبال، على امتداد زمن جيولوجي طويل وبعده طرق منها الترسيب وبناء الأرضة القارية وإضافة الباثوليثات والصخور البركانية المتكونة نتيجة الانصهار في الوشاح على امتداد نقاط الاندساس والتحام الألواح الصغيرة.

9. عندما توجد بقايا من قشرة محيطية والمسماة بالآوفوليت، داخل قارة حديثة، فإن تلك البقايا تحدد مكان محيط قديم اختفى عندما اتحدت قارتان.

10. يبدأ تكسر القارات غالباً بتكون قبة من القشرة القارية في عدة أماكن. وتتكسر حيثئذ كل قبة

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الانترنت)

<http://fishnu.glg.nau.edu/people/jhw/Tibet/Tibet.html>
<http://main.amu.edu.pl/~sgp/gw/gw1.htm>
http://topex.ucsd.edu/marine_topo/mar_topo.html
<http://www2.nature.nps.gov/gcd/low/mountain.htm>
http://nscobio.secd.ctc.edu/tfurutani/field_trip/northcascades.html

المصطلحات المهمة

active margin	حافة نشطة	orogenic belt	حزام تجبل
aulacogen	أولاكوجين	orogeny	تجبل (بناء الجبال)
block faulting	تصدع كتلى	passive margin	حافة مستقرة
craton	وسية	platform	رصيف
epeirogeny	إيبروجينى	suture	دورز (التحام)
failed rift	خسيف خامل	suture zone	نطاق دورز (التحام)
metamorphic belt	حزام تحولى	sedimentary basin	حوض رسوبى
microplate terrane	لوح صغير	shield	درع
mountain	جبل	three-armed graben	أخدود ثلاثى الأذرع
mountain belt	حزام جبالى	thrust sheets	قُرش دسر
mountain chain	سلسلة جبال	triple junction	ملتقى ثلاثى الأذرع
mountain range	مد جبالى (ج مدود جبلىة)		
mountain system	منظومة الجبال		
orogenesis(orogeny)	نشأة الجبال		

الأسئلة

- 1- ما الملامح الجيولوجية التي تمكننا من التعرف على
الحسف القارى خلال الزمن الجيولوجى الماضى؟
التزايد.
- 7- اذكر كيف يزداد حجم ومساحة القارات بعملية
الجزء الداخلى للقارات تكون عادة أحدث
أم أقدم من الحواف؟ لماذا؟
- 8- هل الأجزاء الداخلية للقارات تكون عادة أحدث
أم أقدم من الحواف؟ لماذا؟
- 2- ما الحسيف الخامل؟ اذكر أهمية تكون نطاقات
الحسف الخاملة لتفسير تكسر القارات.
- 9- كيف يمكن تعرف لوح صغير؟ كيف يمكن إثبات
أن اللوح الصغير نشأ بعيداً أم بالقرب من أماكن
تواجده؟
- 3- لماذا تكون جبال الأنديز أعلى من جبال الألب؟
- 4- اذكر طريقتين تتكون بهما الجبال دون أو بقليل من
الطوى والتصدع.
- 10- ما الحافة المستقرة؟ اذكر مثلاً لحافة قارية
مستقرة وأخرى نشطة.
- 5- اذكر مثلاً لأنظمة جبال لانزال عمليات بناء
الجبال بها نشيطة.
- 11- قارن بين قوى التشوه المصاحبة للجبال المتكونة
نتيجة التصدع الكتلى ، وتلك المصاحبة لمعظم
أحزمة الجبال الرئيسية.
- 6- كيف يفسر الجيولوجيون وجود أنظمة جبال
داخل القارات ، مثل جبال الأورال فى روسيا؟

الفصل

19

مصادر الطاقة والثروة المعدنية

ا. أنواع الموارد الجيولوجية

أ. الموارد والاحتياجات

II. استخدام الطاقة

III. مصادر الطاقة

أ - البترول: الزيت الخام والغاز الطبيعي

1. تواجد الزيت الخام والغاز الطبيعي

2. استخراج الزيت

ب - الخام الثقيل ورمال الزيت (الرمال البترولية)

جـ - طفيل الزيت

د - الفحم

1 - أنواع الفحم

2- تواجد الفحم

3- التأثيرات البيئية

هـ - اليورانيوم

IV. المصادر البديلة للطاقة

V. الرواسب المعدنية والخامات (الركازات)

أ - أصل الرواسب المعدنية

1- الرواسب المعدنية الصحارية

2- الرواسب المعدنية الحمرائية

3- الرواسب المعدنية المتحولة

4- الرواسب المعدنية الرسوبية

5- رواسب الركيزة (المراد)

6- الرواسب المعدنية المتبقية (المتخلفة)

ب - أقاليم التمعدين

الحديد أصعب بكثير من صهر النحاس ، ولذلك فلقد جاء تطور صناعة الحديد متأخرا جدا ، أى قبل حوالى 3300 سنة مضت .

وقد كان البابليون الذين عاشوا في العراق قبل 4500 سنة مضت هم أول من استخدم الزيت كوقود بدلا من الخشب . وكان الصينيون أول من أنشأ المناجم قبل 3100 سنة مضت لاستخراج الفحم واستخدامه . كما كانوا أول من حفر آبارا للتنقيب عن الغاز الطبيعي ، حيث وصل عمق بعض الآبار إلى حوالى 100 متر .

ثم أتى الإغريق فالرومان منذ 2500 سنة مضت واعتمدوا على معادن أخرى غير الفلزات والوقود ، فقاموا بتصنيع الأسمنت والجبس والزجاج والخزف الصينى . ثم أخذت المواد التى تستخرج من المناجم تنوع ، وتستخدم في أغراض متنوعة ، حيث يوجد اليوم استخدامات صناعية لكل العناصر الكيميائية المتواجدة في الطبيعة تقريبا . وهناك أكثر من 200 نوع من المعادن تستخرج من المناجم وتستخدم في أغراض متنوعة .

فمثلا ، يلزم لتصنيع السيارة استخدام عديد من الموارد المعدنية مثل الحديد والكروم والمنجنيز والتيتانيوم والبلاتين والقصدير والنحاس والرصاص والألومنيوم ، بالإضافة إلى الكوارتز المستخدم في صناعة زجاج نوافذ السيارة . كما نحتاج السيارة للبتروكوكود وزيت ، بالإضافة إلى مطاط الإطارات ، وكمواد بلاستيكية للأجزاء الكهربائية ومواد التنجيد . كما أن هناك الكثير من الموارد المعدنية الأخرى التى تستخدم في صناعة السيارات مثل التنجستن المستخدم

يرتبط ظهور الحضارات ارتباطاً وثيقاً بمصادر الثروة المعدنية ، حيث لا تقوم أى حضارة دون وجود مصادر للثروة المعدنية . فقد بدأ أسلافنا منذ ملايين السنين استخدام تلك الثروة ، فالتقطوا أحجارا ذات أشكال مناسبة واستخدموها في الصيد ، كما اكتشفوا أن الفلنت والتشرت والأوبسديان وغيرها تكون شديدة الصلابة فاستخدموها كسكاكين ورؤوس للرمح . وحيث إن معظم تلك الأحجار تكون محدودة الانتشار ، فقد قامت تجارة على تلك الأحجار . كما بدأوا في جمع الملح والتجارة فيه . وعندما بدأت الزراعة أصبح النظام الغذائى للبشر يعتمد على الحبوب مثل القمح والشعير والذرة ، كما أصبحت هناك حاجة لكميات إضافية من الملح . ولا نعرف على وجه الدقة متى وأين بدأ استخراج الملح من المناجم . وقد قطعت طرق نقل الملح الكرة الأرضية قبل التاريخ المسجل .

كما بدأ استخدام الفلزات لأول مرة قبل 17000 سنة مضت ، حيث يوجد النحاس والذهب في الطبيعة كفلزات عنصرية ، ولذا كانا أول الفلزات التى استخدمها الإنسان . ونظراً لندرة النحاس الفلزى في الطبيعة فقد بحث أسلافنا عن مصادر أخرى للنحاس ، حيث استخرجوه من بعض الخامات بعملية صهر المعادن smelting قبل حوالى 6000 سنة مضت . كما استطاعوا أن يصهروا معادن الرصاص ، والقصدير والزنك والفضة وفلزات أخرى قبل آلاف السنين .

ثم تلى ذلك توصل الإنسان لتقنية خلط الفلزات ببعضها لعمل سبائك مثل سبيكة البرونز المكونة من خلط من النحاس والقصدير . وقد كانت عملية صهر

فبعض الموارد الأرضية مثل الأغذية ونباتات الغابات يمكن أن يعاد إنتاجها بمعدل استهلاكها نفسه ، فهي مصادر متجددة renewable resources ، أما البترول والحديد والرمال والحصى وكذلك كل الموارد الجيولوجية الأخرى فإنها تستخدم بمعدلات أكبر بكثير من المعدلات التي تتكون بها الرواسب الجديدة ، فالفحم والبترول يستهلكان بمعدل أسرع بكثير من المعدل الذي يتكونان به . وتؤدي هذه الحقيقة إلى تزايد أهمية وجود مصادر متجددة مثل الطاقة الشمسية وهي طاقة لا تنفذ ، وأيضا الوقود الذي يتكون من أصل عضوي مثل البيوجاز الذي يستخرج من البقايا النباتية وكذلك الطاقة النووية والانشطارية . وهكذا فإن الاكتشافات الجديدة وإعادة تدوير المواد وإيجاد البدائل يمكن أن تساعد في زيادة عمر بعض الموارد الطبيعية ، إلا أنه من المعروف أن بعض هذه الموارد الطبيعية سوف تنضب أو تستنفذ كلية خلال فترة زمنية محدودة .

أ. الموارد والاحتياطيات

يستخدم مصطلح الموارد resources كمصطلح عام لوصف الكمية الكلية من المادة الجيولوجية المهمة الموجودة في الرواسب الجيولوجية ، سواء تلك التي اكتشفت فعلا أو التي لم تُكتشف بعد ، وتشمل الرواسب التي تستخرج بطريقة اقتصادية حاليا ، وأيضا تلك التي ستستخرج بطريقة اقتصادية في المستقبل (شكل 1.19) ، والاحتياطيات reserves ، وهي جزء صغير من الموارد الجيولوجية ، وتشمل الرواسب المكتشفة والتي يمكن استخراجها بطريقة اقتصادية وقانونية في الظروف الحالية . وجدير بالملاحظة ، أنه من الصعب تقدير الموارد الجيولوجية ،

في أسلاك المصابيح الكهربائية وكذلك الكبريت اللازم لحامض البطارية .

وقد شعر الناس مؤخرا بأن الموارد المعدنية آخذة في النضوب بسبب سرعة استهلاكها ، فقللوا من معدل ذلك الاستهلاك . إلا أنه من المستحيل الاستغناء عن تلك الموارد كلية .

١. أنواع الموارد الجيولوجية

تعرف الموارد الجيولوجية geologic resources بأنها مواد ذات قيمة من أصل جيولوجي ويمكن استخراجها من الأرض . وهناك ثلاث مجموعات رئيسية من الموارد الجيولوجية وهي :

1- موارد الطاقة energy resources - وتشمل البترول (الزيت الخام والغاز الطبيعي) والفحم واليورانيوم ، بالإضافة إلى موارد أخرى مثل موارد الحرارة الأرضية .

2- الموارد المعدنية mineral resources وتشمل :

أ- الموارد الفلزية metallic resources :

وتشمل الحديد والنيحاس والألومنيوم والرصاص والزنك والذهب والفضة وعديداً من الفلزات الأخرى .

ب- الموارد اللافلزية nonmetallic resources :

وتعرف أيضا بالمعادن

الصناعية أو الصخور الصناعية ، مثل الكبريت وأحجار الزينة والجبس والمخصلات والرمل والحصى وأحجار البناء والحجر الجيري (اللازم لصناعة الأسمنت) ، وعديد من المواد الأخرى .

وتعتبر الموارد الجيولوجية مصادر غير متجددة nonrenewable resources ، حيث إن تلك الموارد تتكون ببطء للدرجة أن معدلات الاستهلاك السريع الحالي لها يمكن أن تؤدي إلى استهلاكها بسرعة .

ويجب أيضا أن يكون استخراج الراسب مربحاً ، وذلك بتحقيق عدة عوامل منها أن تكون تكاليف الاستخراج والتي تشمل أجور العاملين ووقود الآلات معقولة ، وأن تستخدم تقنيات حديثة في الاستخراج ، وأن تخفض الضرائب على الموارد ، وتؤدي كل هذه العوامل إلى زيادة الاحتياطيات أيضا .

١١. استخدام الطاقة

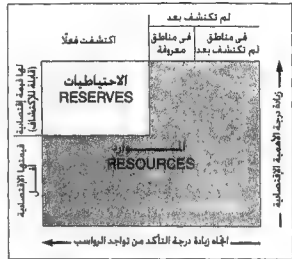
الطاقة عنصر أساسي في حياة البشر ، وقد تؤدي أزمة في إمدادات الطاقة إلى توقف الحياة في المجتمعات الحديثة . كما قد تسبب الحروب توقف إمدادات البترول ، كما حدث تراجع اقتصادي ملحوظ وتضخم في الأسعار بسبب التغير الدائم في أسعار البترول .

وقد أدت زيادة التصنيع في العالم إلى زيادة الطلب على الطاقة وتغير أنواع الطاقة المستخدمة . فقد اعتمدت الثورة الصناعية في القرنين الثامن عشر والتاسع عشر على الطاقة المستمدة من الفحم ، وبالتالي زادت الحاجة إلى الفحم ، وزاد البحث عنه .

وبعد حوالي نصف قرن من حفر أول بئر للبحث عن البترول في أمريكا عام 1859م بدأ الزيت والغاز يجلان عمل الفحم ، ليس بسبب الاحتراق النظيف دون أي رماذ فقط ، ولكن أيضا لأنه يمكن نقلها بخطوط الأنابيب ، وكذلك بالبواخر والسكك الحديدية .

وقد شهدت السنوات الأخيرة من القرن العشرين تقدما هائلا في صناعة المفاعلات النووية ، كما زادت في الوقت نفسه معاملات الأمان في تلك المفاعلات ، بحيث أصبحت الطاقة النووية هي البديل الوحيد للوقود الحفري نظرا لتكلفتها المنخفضة وأمانه البيئي .

لأن ذلك التقدير لابد أن يشمل أماكن تواجد الرواسب التي لم تُكتشف بعد ، وأحجامها بالإضافة إلى معرفة نوع الراسب الذي قد يكون استخراجها اقتصاديا يوما ما .



شكل (1.19): الفرق بين الاحتياطيات والموارد الطبيعية . تشمل الاحتياطيات (والتي تشمل الرواسب المكتشفة والتي يمكن استخراجها بطريقة اقتصادية وقانونية في الظروف الحالية) وهي جزء صغير من الموارد الجيولوجية (والتي تشمل الرواسب الجيولوجية ، سواء تلك التي تم اكتشافها أو التي لم تُكتشف بعد ، وهي تشمل الرواسب التي تستخرج بطريقة اقتصادية حاليا ، وأيضا تلك التي تستخرج بصورة اقتصادية مستقبلا) .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlson, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

وبمجرد أن تُقدر كمية الموارد الجيولوجية بدقة ، فلا يجب أن يتغير هذا التقدير لاحقا ، نظرا لأن تقدير الموارد الجيولوجية يكون أساسا تقديرا للمخزون الكلي للمورد ، أما تقدير الاحتياطيات فيتغير باستمرار . فاستخراج أي مادة يؤدي إلى خفض الاحتياطيات بينما تؤدي الاكتشافات الجديدة إلى زيادتها ، مثل رصد الشخص في البنك يزداد وينقص باستمرار ، أما الموارد الجيولوجية فهي مثل دخل الشخص المتوقع طوال حياته .

القارية ، حيث يكون معدل الترسيب في هذه البيئات عالياً ، كما تُدفن المادة العضوية ونُحْمَى من التحلل .

وعندما تُدفن المادة العضوية للملايين السنين ، فإنها تتحول ببطء إلى مركبات سائلة وغازية من الهيدروجين والكربون (الهيدروكربونات) ، حيث تخضع درجات الحرارة التي ترتفع مع زيادة العمق تلك التفاعلات الكيميائية . والهيدروكربونات هي المواد القابلة للاحتراق في البترول (الزيت الخام والغاز الطبيعي) .

والتجمعات الزيتية **oil pools** هي تراكبات ذات قيمة اقتصادية من البترول تحت الأرض . وتواجد تلك التجمعات البترولية عندما تتحقق ثلاثة شروط معا وهي: (1) صخر مصدري **source rock** يحتوي على مادة عضوية تتحول إلى بترول نتيجة الدفن وتغيرات ما بعد الترسيب ، مثل صخر الطفل ، ويتم الدفن على عمق كاف (أو نضوج حراري **thermal maturity**) ليتم "طبخ **cooking**" الزيت والغاز من المادة العضوية . (2) صخر خزان **reservoir rock** ذو مسامية ونفاذية تكفي لأن يخزن البترول وينتقل عبره ، مثل الحجر الرمل أو الحجر الجيري ، (3) مصيدة بترولية **oil trap** ، وهي مجموعة من الظروف التي تحتفظ بالبترول وتحتجزه بكميات كبيرة في صخر الخزان وتمنع هروبه بالهجرة **migration** ، ولابد من تواجد الظروف الثلاثة السابقة معا . وإذا لم يتحقق أحد تلك الشروط ، فلن يستطيع الصخر حفظ وحجز الزيت أو الغاز . ويؤدي ضغط الراسب الطيني العضوي في طبقات المصدر إلى دفع السوائل والغازات المحتوية على الهيدروكربونات في الصخور المسامية (مثل الحجر الرمل أو الحجر الجيري المسامي) التي تمثل خزانات الزيت . وتتسبب الكثافة المنخفضة للزيت والغاز في طفو الزيت والغاز فوق الماء الذي يتواجد بصفة دائمة تقريبا في مسام الصخور المنفذة .

وقد تزايد الطلب على إنشاء المحطات النووية لتوليد الطاقة الكهربائية ولتحلية المياه ، كما احتل الوقود النووي مؤخرا موقع الصدارة بين مصادر الطاقة الأخرى .

III. مصادر الطاقة

تشمل مصادر الطاقة البترول والفحم واليورانيوم بالإضافة إلى المصادر الأخرى مثل مصادر الحرارة الأرضية . وستناول فيما يلي تلك المصادر بالإضافة إلى مصادر الطاقة البديلة.

أ. البترول: الزيت الخام والغاز الطبيعي

يستخدم مصطلح البترول **petroleum** كمصطلح عام في صناعة البترول ليشمل الزيت الخام والغاز الطبيعي ، كما يستخدم مصطلح البترول أحيانا كمترادف للزيت الخام . والزيت الخام **crude oil** هو سائل خليط من هيدروكربونات (مركبات تحتوي على الهيدروجين والكربون) توجد في الطبيعة ، يمكن تقطيرها لتنتج أنواعا عديدة من المنتجات ، أما الغاز الطبيعي **natural gas** فهو خليط غازي من هيدروكربونات طبيعية يرجع أصلها وتواجدها إلى أصل وتواجد الزيت الخام أيضا . ويستخرج الغاز الطبيعي من الآبار نفسها التي يستخرج منها الزيت ، على الرغم من أن كليهما يمكن أن يوجد منفصلا .

1. تواجد الزيت الخام والغاز الطبيعي

يتكون الزيت الخام والغاز الطبيعي حين يزيد إنتاج المواد العضوية عن استهلاكها بالتحلل أو بالكائنات الحية آكلة الجيف . ويتوافر هذا الشرط في البيئات التي يزيد فيها تكون المواد العضوية كالمناطق البحرية ، وحيث يكون الأكسجين في رواسب القاع لا يكفي ليحلل كل المادة العضوية . ويتوافر هذان الشرطان في كثير من أحواض الترسيب المغمورة على الرفوف

الغاز يتجمع في جيوب تحت ضغط عال نسبياً فوق الزيت. وقد تسبب الصدوع في نشأة مصائد بترولية عندما تكسر الصخور الحزانات المنفذة وتترلق لتجاور طبقة من الطفل غير المنفذ التي تمنع هجرة البترول (شكل 2.19 ب).

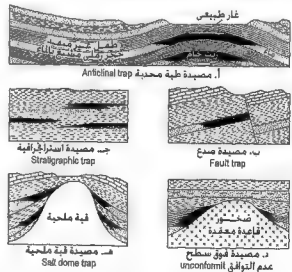
أما المصيدة الاستراتيجرافية أو الطباقية stratigraphic trap فإنها تنشأ نتيجة الترسيب الطبيعي الأصل أكثر من الطي أو التصدع. وتتواجد المصيدة الاستراتيجية عندما تتواجد عدسة من الحجر الرمل داخل طبقة أكبر من الطفل غير المنفذ (شكل 2.19 ج). كما قد ينشأ هذا النوع من المصائد عندما تنحصر طبقة من الحجر الرمل المائلة داخل تتابع من الطفل. كما يمكن أن يتراكم الزيت تحت أسطح عدم التوافق unconformities (شكل 2.19 د)، وقد تسبب القباب الملحية domes salt في نشأة بعض أنواع المصائد أيضاً (شكل 2.19 هـ).

أما حقول البترول oil fields فهي مناطق يوجد تحتها بركة أو أكثر من الزيت oil pools. وتوجد في منطقة الشرق الأوسط معظم حقول البترول العملاقة في العالم، وخاصة في المملكة العربية السعودية والكويت. كما تتواجد أيضاً في روسيا وأذربيجان وفنزويلا والمكسيك والولايات المتحدة الأمريكية.

2. استخراج الزيت

عندما يتم اكتشاف تجمع أو حقل بترولي نقوم بحفر آبار في الأرض. وتستخدم عادة أبراج الحفر (ديريك) derrick الثابتة (شكل 3.19)، حيث تستعمل أنابيب حفر طويلة. وتستخدم الآن أيضاً بعض برقيات الحفر drilling rigs المثقولة والتي يتم تحريكها باستمرار. وعندما يصل البئر إلى تجمع زيتي، يصعد الزيت إلى أعلى البئر بسبب قلة كثافته عن الماء أو بسبب ضغط الغاز المتمدد الموجود أعلى الزيت. ويقل ضغط الغاز

ويحتاج وجود الغاز الطبيعي لتحقيق الشروط نفسها اللازمة لتراكم الزيت. ويمكن أن يتواجد الغاز عند أعماق أكبر من تلك التي يتواجد عندها الزيت، وقد تؤدي الاختلافات في صخر المصدر أو عمق السدف أو التاريخ الحراري للمادة العضوية في التحكم في تراكم الغاز أو الزيت أو كليهما معاً. ويوضح (شكل 2.19) عدة أنواع من المصائد البترولية للزيت والغاز. وتعتبر الطيات المحدبة anticlines (شكل 2.19 أ) والتي سبق وصفها في الفصل العاشر، أكثر المصائد البترولية شيوعاً، فحقل بترول النعلا El Nala في المملكة العربية السعودية - أحد أكبر حقول البترول في العالم - يمثل مصيدة داخل طية محدبة. فعندما يتواجد الزيت والماء مع بعضها في طبقات الحجر الرمل المطوية التي تعلوها طبقات من الطفل غير المنفذ، فإن قطرات الزيت الصغيرة تنساب خلال الحجر الرمل المنفذ في اتجاه قمة الطية، نظراً لأن الزيت أقل كثافة من الماء. وحيث إن الغاز الطبيعي أقل كثافة من الزيت، فإن



شكل (2.19): قطاعات لتوضيح الأنواع المختلفة من المصائد التركيبية، والتي تكون مناسبة لتجمع للزيت الحام والغاز الطبيعي. (After Holmes, D.L., 1984: Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson, Great Britain).

ويأتى أكثر من ربع إنتاج العالم من الزيت وحوالى خمس إنتاج العالم من الغاز الطبيعى من المناطق البحرية، على الرغم من أن الحفر فى المناطق البعيدة عن الشواطئ يكلف ستة أو سبعة أمثال الحفر على اليابسة. ويوضح شكل (3.19) مثالا لتواجيدات المناطق البحرية فى خليج السويس، بجمهورية مصر العربية.

(ب) الخام الثقيل ورمال الزيت (الرمال البترولية)

يعرف الخام الثقيل **heavy crude** بأنه بترول كثيف لزج ينساب من البئر بمعدل انسياب بطئ إلى الدرجة التى تجعله غير اقتصادى. ولذلك يستعد الخام الثقيل من تقدير الاحتياطيات أو الموارد الطبيعية للزيت الخفيف **light oil** الأقل لزوجة أو الزيت العادى. وقد يتسبب دفع بخار الماء أو المذيبات فى الآبار فى سرعة انسياب الخام الثقيل. وإذا تم استخراجه، فإن الخام الثقيل يمكن تكريره إلى جازولين (بنزين) ومنتجات أخرى عديدة، مثله مثل الزيت الخفيف. ومعظم الزيت فى كاليفورنيا هو من الخام الثقيل.

ورمال الزيت **oil sands** (الرمال البترولية أو رمال القطران **tar sands**) هى رواسب رمال أو حجر رملى تلتحم حبيباتها بالزفت، والزفت **asphalt** هو مادة صلبة، ولذلك فإن رمال الزيت تستخرج غالباً من مناجم بدلاً من حفر آبار خلالها، على الرغم من أن تقنيات تخفيض لزوجة الخام الثقيل يمكن تطبيقها أيضاً على رمال الزيت.

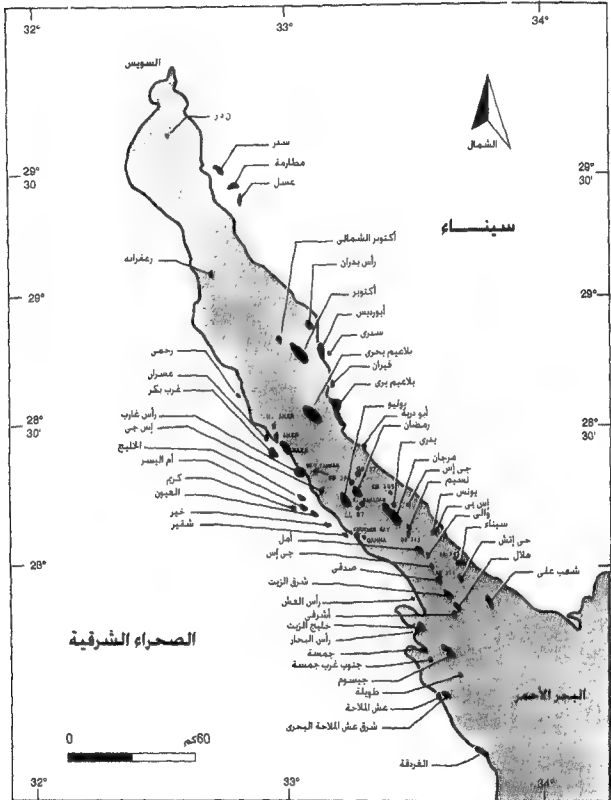
وأصل الخام الثقيل ورمال الزيت غير معروف حتى الآن. وربما تكون قد تكونت من الزيت العادى نتيجة فقد المكونات الخفيفة نتيجة البخر أو أى عمليات أخرى. وقد يتسرب الزيت من رمال الزيت أو الزفت إلى سطح الأرض نتيجة البخر البطيء. ومن ناحية

تدرجياً حتى ينتهى، ويتم حيثذ ضخ الزيت من الآبار. وقد يتم ضخ الماء أو بخار الماء فى الآبار المجاورة لتساعد فى دفع الزيت لأعلى. ويتم فصل الزيت الخام فى مصفاة البترول إلى غاز طبيعى وغازولين (البنزين) وكيروسين وزيت تشحيم وزيت وقود وشحم وأسفلت وبارافين. وتشمل البتروكيمياويات المصنعة من البترول الأصباغ والأسمدة والأدوية والمطاط الصناعى والمتفجرات والدهانات والمذيبات والألياف الصناعية واللدائن (البلاستيك) المستخدمة فى عديد من المنتجات مثل أقراص الحاسبات المدجة وأشرطة التسجيل وأكياس النفايات.



شكل (3.19): جهاز حفر عن البترول **drilling rig**.

ونظراً لصعوبة اكتشاف مزيد من الزيت، فقد امتد البحث عن البترول عموماً إلى مناطق جديدة غير مطروقة؛ حيث ساهمت الأرضة البحرية **offshore platforms** فى البحث عن البترول فى رواسب الأرضة القارية للمحيطات وأحياناً أبعد من ذلك.



شكل (4.19): حقول البترول في خليج السويس .

أخرى فقد تتواجد بعض رمال الزيت والحام الثقيل تحت سطح الأرض عند أعماق تصل إلى 4000 متر.

بعض المشكلات وتقليل الماء المستخدم . ومن الممكن أن يتم حرق طفل الزيت الذي تتخلله الشقوق في حفر ضخمة تحت سطح الأرض . وتتسبب الحرارة في فصل معظم الزيت من الصخور ، حيث يمكن تجميع الزيت كسائل . ويلاحظ أن الحرائق قد يكون من الصعب التحكم فيها ، كما أنها تؤثر في مستويات المياه الأرضية . وهناك اقتراح آخر يشمل تسخين الطفل بواسطة موجات الراديو أو الموجات الدقيقة جدا microwaves لفصل الزيت السائل من الصخر .

د. الفحم

الفحم صخر رسوبي يتكون من ضغط المادة النباتية التي تتحلل بالكامل . ويمثل الفحم المصدر الرئيسي الثالث للطاقة بعد الزيت والغاز الطبيعي . ولقد زاد استخدام الفحم مؤخرا بعد أن أصبح البترول أكثر ندرة وتكلفة .

ويستخدم حوالي 88 ٪ من الفحم في الوقت الحالي في توليد الكهرباء بالولايات المتحدة الأمريكية . كما يستخدم الفحم أيضا في عمل فحم الكوك الذي يستخدم في صناعة الصلب . وقد يستخدم الفحم في المستقبل بدلا من البترول في تصنيع بعض الكيماويات . وقد يستخدم غاز الفحم coal gas وزيت الفحم coal oil في بعض الأغراض التي يستخدم فيها الغاز الطبيعي والزيت ، على الرغم من أنها مازالا أكثر تكلفة في إنتاجها .

1. أنواع الفحم

الحث peat هو حطام نباتي لم يدفن إلى عمق يكفي ليتحول إلى فحم ، وهو يتجمع في ماء يحوى نسبة ضئيلة من الأكسجين ، وبالتالي القليل من البكتريا التي تسبب التحلل . وهو يمثل المرحلة الأولى في تكون الفحم ، وتعرف درجة التحول التي وصل إليها الفحم

وتحتوى معظم هذه الحامات على تركيزات عالية من الكبريت وبعض الفلزات مثل النيكل والفاناديوم أكثر من تلك الموجودة في الزيت العادى ، وذلك قد يرجع إلى أن الحام الثقيل ورمال الزيت لها أصل مختلف عن الزيت الخفيف .

ج. طفل الزيت

طفل الزيت oil shale هو طفل أسود أو بنى يمتوى على نسبة عالية من مادة عضوية صلبة غير قابلة للذوبان تعرف بالكيروجين kerogen ، يستخرج الزيت منها بالتقطير . وأفضل طفل زيت يوجد في الولايات المتحدة في متكون جريرين ريفر Green River Formation الذي يغطى أكثر من 40000 كم² في كولورادو وومينج ويوتا حيث يصل سمك الرواسب إلى حوالى 650 مترا . وقد تكوّن طفل الزيت الذي يمتوى على عديد من حفریات هياكل الأسماك من طين ترسب على قاع بحيرات ضحلة وكبيرة خلال حين الإيوسين . ويرجع أصل المادة العضوية إلى طحالب وكائنات عضوية أخرى عاشت في البحيرات .

ويتم استخراج الزيت من طفل الزيت في مصانع التقطير ، إلا أن السعر المنخفض للبترول في بعض الأوقات يجعل استخراج طفل الزيت غير اقتصادى . وقد يسبب استخراج طفل الزيت من المناجم مشكلات بيئية ؛ حيث يتمدد الطفل أثناء التقطير فيشغل منطقة من الأرض يكون استصلاحها مشكلة ، ولذا يكون من الأفضل تجميع الطفل المستهلك في الوديان وكبسه . فلا بد من توافر كمية كبيرة من الماء لعملية التقطير والاستصلاح ، حيث يظل الإمداد بالمياه مشكلة ، خاصة في المناطق القاحلة .

وقد تساعد التقنيات الحديثة في استخراج الزيت في مكانه دون نقل الطفل إلى سطح الأرض ، في حل

جدول (1.19): رتب (أنواع) ranks الفحم .

اللون	محتوى الماء %	المتطايرات الأخرى %	الكربون المثبت (المتأصل)
بنى	75	10	15
بنى إلى أسود	45	25	30
أسود	25	35	40
أسود	15-5	30-20	75-50
أسود	5	5	90

(1) الخث ليس فحاً

(2) الكربون المثبت (المتأصل) fixed carbon هو المادة الصلبة القابلة للاحتراق بعد استبعاد الرطوبة والماء والمواد المتطايرة volatiles والرماذ .

2. تواجد الفحم

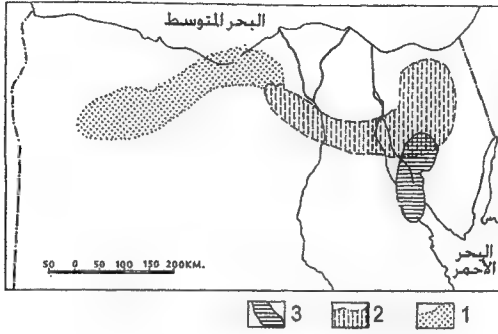
يوجد الفحم في طبقات تتراوح في السمك بين سنتيمترات قليلة إلى 30 متراً أو أكثر. وإذا وجدت الطبقات مدفونة في الأعماق فإنه يتم حفر المناجم تحت الأرض لاستخراج الفحم. وعندما تتواجد طبقات الفحم بالقرب من سطح الأرض فإن الفحم يستخرج بطريقة المنجم المكشوف strip mine، حيث يتم إزالة الغطاء الصخري حتى ينكشف الفحم عند السطح.

وتتواجد رواسب الفحم المنكشفة في مصر بمنطقة المغارة (عصر الجوراسي) وأم بجيا (عصر الكربوني) بسيناء. وقد يتواجد الفحم كرواسب تحت سطحية كما هو الحال بمنطقة عيون موسى (عصر الجوراسي) بسيناء بمصر (شكل 5.19).

3. التأثيرات البيئية

يؤدي استخراج الفحم إلى خلق مشكلات بيئية. حيث يؤدي وجود منجم إلى انخفاض منسوب الماء

بالترتبة rank وهي الأساس الذي يقسم الفحم طبقاً له إلى سلسلة تبدأ من اللجنيت إلى الأنثراسيت (جدول 1.19). فعندما يكون الخث جافاً، فإنه يمكن حرقه كوقود. ومع زيادة الضغط، فإن الخث قد يصبح ليجنيت (فحم بنى). وقد يظل الليجنيت محتوياً على أجزاء من الخشب يمكن رؤيتها. والليجنيت lignite هو فحم بنى أسود اللون، وقد يكون بنيًا ويتجمد عندما يجمد في الهواء. ويكون اللجنيت عرضة للاحتراق عندما يتأكسد في الهواء، مما يحد من استخدامه كوقود. ويتميز الفحم تحت البيتوميني subbituminous coal والفحم البيتوميني bituminous coal باللون الأسود ووجود طبقات من مواد نباتية مختلفة. وهما يشتعلان على الفور ويحترقان بلهب مدخن. أما الأنثراسيت anthracite فهو فحم صلب أسود اللون، يتكون عموماً تحت ضغط إقليمي يصاحبه طي. والأنثراسيت يشتعل بصعوبة ودون دخان.



شكل (5.19): توزيع رواسب الفحم في مصر .

- (1) المنطقة المحتوية على أعلى محتوى من الفحم في صخور الطباشيري السفلى .
 (2) المنطقة المحتوية على أعلى محتوى من الفحم في صخور الجوراسي الأوسط .
 (3) المنطقة المحتوية على أعلى محتوى من الفحم في صخور الكربوني السفلى .

(After Adindani, A., and Shkhov, 1970: The occurrence of coal and some geological features of the Mesozoic and Paleozoic sediments of Egypt. In: Said, R. (Editor): The Geology of Egypt, Balkama, 1990)

أو في معدن الكارنوتيت carnotite الأصفر ، وهو أكسيد مائي معقد يوجد على هيئة قشور في الصخور الرسوبية. وينقل الماء الأرضي (الجوفي) أكاسيد اليورانيوم العالية الذوبان في الماء بسهولة . وقد تختزل المادة العضوية اليورانيوم مما يجعله غير قابل للذوبان نسبيا، ولذلك يرسب اليورانيوم عندما يصاحب المواد العضوية.

ويستخدم اليورانيوم لتوليد الكهرباء في المفاعلات النووية ، كما يستخدم في صناعة الأسلحة النووية . وتنتج المفاعلات النووية في الوقت الحالي حوالي 7. % من احتياجات الطاقة في الولايات المتحدة . بينما تنتج الطاقة النووية أكثر من نصف إنتاج الكهرباء في فرنسا .

الأرضي محليا نتيجة ضخ المياه الأرضية خارج المنجم. كما يؤدي سحب المياه من المناجم لأن تصبح عالية الحموضة . كما تؤدي إلى تلوث المجاري المائية ومصادر المياه عند سطح الأرض. ويؤدي حرق الفحم إلى أن يتلوث الهواء بالرماد وغازات الكبريت ، ولكن معظم المكونات الضارة يمكن إزالتها باستخدام التقنيات الحديثة. ويؤدي حل المشكلات البيئية المصاحبة للفحم، إلى ارتفاع تكلفة استخراجها وسعر بيعه .

هـ. اليورانيوم

يوجد اليورانيوم - المستخدم في المفاعلات النووية - في معدن البتسبلند pitchblende وهو أكسيد يورانيوم أسود يوجد في العروق الحرماية وفي غيرها ،

والفحم واليورانيوم . حيث تساهم القوة الهيدروكهربية (القوة الكهربائية المائية) hydroelectric power وهي توليد الكهرباء من القوة المائية في حوالى 4٪ من احتياجات الطاقة في الولايات المتحدة. ويتم توليد الكهرباء باستخدام التوربينات من الماء الساقط من خزانات المياه وراء السدود. وفي مصر، يتم توليد الكهرباء من التوربينات الموجودة عند السد العالى بأسوان . وقد تساهم طاقة حرارة الأرض geothermal power بصورة أساسية في احتياجات الطاقة، خاصة إذا تم استخدام تقنيات ناجحة لتجميع حرارة المناطق خاصة تلك غير المميزة بينابيع حارة فوق سطح الأرض. وتساهم طاقة حرارة الأرض عموماً بحوالى 0.2٪ فقط من احتياجاتنا من الطاقة. وقد تساهم الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في سد احتياجاتنا في المستقبل (شكل 6.19)، خاصة إذا تم تطوير طرق تخزين الطاقة . وتبذل في الوقت الحالى جهود ضخمة لتحسين تقنية تجميع الطاقة الشمسية . وتشمل الطرق الأخرى لتوليد الطاقة استخدام طاقة المد والجزر وطاقة الأمواج وطاقة تيارات المحيط والطاقة الناتجة من الاختلافات في درجة الحرارة وأسيا في المحيطات .

وترجع الأهمية الكبرى لعدد من مصادر الطاقة البديلة أنها طاقات متجددة ، فنحن لا نستنفذ أشعة الشمس أو الرياح أو المد والجزر عندما نستخدم طاقاتها. وقد يؤدى انتشار استخدام مصادر الطاقة المتجددة في المستقبل إلى تقليل احتياج العالم إلى الوقود الحفري .

ومن المتوقع زيادة الطلب العالمى على اليورانيوم نتيجة الاتجاه السائد منذ بداية الألفية الثالثة على استخدام الطاقة النووية كمصدر بديل للوقود الحفري. وقد حدث تقدم ملحوظ في مشكلة المخلفات المشعة للمحطات النووية التي تعتبر أقل خطورة على البيئة من مخلفات الفحم والبترول كوقود . وعلى الرغم من حادث تشيرنوبيل فلم تتأثر كثيراً النظرة ناحية الطاقة النووية ، حيث إن هذا المفاعل كان يفقد إلى وجود الدرع الخارجى الذى يمنع التسرب الإشعاعى ، كما أن المفاعل لم يكن يحظى بمعاملات الأمان الواجبة . وقد حدث الشيء نفسه تقريباً في بنسلفانيا ، ولكن الدرع الواقى احتوى كل الإشعاع في داخله ولم يترسب منه أى شئ خارجه.

ويوجد معظم اليورانيوم في جمهورية مصر العربية في الصخور النارية في أكثر من موقع بالصحراء الشرقية . كما تحتوى أيضاً رواسب الفوسفوريت المعضوية ذات الأصل البحرى في فوسفات البحر الأحمر ووادى النيل على اليورانيوم ، ولكن بتركيزات منخفضة . كما تحتوى أيضاً الرمال السوداء المترسبة على الشواطئ الشمالية لدلتا نهر النيل على نسبة صغيرة من المونازيت الذى يحتوى على نسبة منخفضة من الثوريوم.

III. المصادر البديلة للطاقة

هناك عدد آخر من المصادر البديلة alternative sources of energy للطاقة قد تساهم في المستقبل في خفض الاحتياج المتوقع للزيت والغاز الطبيعى



شكل (6.19): الطاقة المتجددة ، حيث تساهم طاقة الرياح في توليد الطاقة . محطة توليد الطاقة من الرياح قرب الغردقة بساحل البحر الأحمر ، مصر .

الذهب والبلاتين يمكن رؤيتها بالعين المجردة. ولكل معدن رتبة أو مستوى تركيز **grade** ، حيث يكون استخراج الراسب الذي تقل درجته عن هذه الدرجة غير اقتصادي (شكل 6.19). وتستخدم كلمة خام للتمييز بين رواسب المعدن المربحة وغير المربحة. ويعني مصطلح خام (ركاز) **ore** تجمعاً من المعادن يمكن استخراج معدن أو أكثر من معدن منه بصورة مربحة. ويوضح جدول (2.19) بعض معادن الخامات الشائعة.

V. الرواسب المعدنية والخامات (الركازات)

يعتمد البحث الناجح عن المعادن المستخدمة في الصناعة على وجود الرواسب المعدنية التي يتم استخلاص المواد المطلوبة منها بأقل تكلفة. والرواسب المعدنية **mineral deposits** هي أي حجم من صخر يحتوي على تركيز عال من معدن أو أكثر. وكلما زاد تركيز المعادن المطلوبة زادت قيمة الراسب. وفي بعض الرواسب تكون بعض المعادن المطلوبة مركزة بدرجة عالية لدرجة أن بعض العناصر النادرة جداً مثل

جدول (2.19): بعض معادن الخامات الشائعة

التركيب	معادن الخام	الفلز
$Al_2O_3 \cdot nH_2O$	Bauxite بوكسيت (خليط معدني)	Aluminium الألومنيوم
$FeCr_2O_4$	Chromite كروميت	Chromium الكروم
Cu	Native copper نحاس خالص (صرف)	Copper النحاس
Cu_2S	Chalcocite الكوسيت	
$CuFeS_2$	Chalcopyrite الكوبيريت	
Au	Native gold ذهب خالص (صرف)	Gold الذهب
Fe_2O_3	Hematite هيماتيت	Iron الحديد
Fe_3O_4	Magnetite ماجنتيت	
PbS	Galena جالينا	Lead الرصاص
MnO_2	Pyrolusite بيرولوسيت	Manganese المنجنيز
HgS	Cinnabar سينابار	Mercury الزئبق
Fe, Ni, S	Pentlandite بنتلانديت	Nickel النيكل
Ag	Native silver فضة خالصة	Silver الفضة
Ag_2S	Argentite أرجنتيت	
SnO_2	Cassiterite كاسيتريت	Tin القصدير
U_3O_8	Pitchblende بيتشبلند	Uranium اليورانيوم
$K(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$	Carnotite كارنوتيت	
ZnS	Sphalerite سفاليريت	Zinc الزنك

($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$) ، وهو ليس معدنا ولكنه أحد خامات الحديد الهامة ، فيحتوي على نسبة حديد أقل من تلك الموجودة في الهيماتيت. وحتى إذا كان المعدن يحتوي على نسبة عالية من الفلز فإنه لا يمكن وصفه بأنه خام، إذا كان الفلز من الصعب جدا استخراجه ، أو لوجود شوائب مصاحبة للخام ، أو يكون موقع الخام بعيدا جدا عن الأسواق ؛ فالريح هو جزء مهم يحدد أنه خام .

وليس من السهل دائما تحديد درجة أو كمية المعدن بدقة . فمن المعلوم أن ما قد يعتبر خاما في وقت ما لا يكون خاما في وقت آخر . ويقدم النحاس مثالا مهما لذلك ، حيث ارتفعت في الوقت الحاضر درجة

وتعتبر كل الخامات رواسب معدنية لأن كلا منها إثراء محلي لمعدن أو أكثر من معدن، أو أشباه المعادن. ومع ذلك، فبالعكس ليس صحيحاً ، إذ ليست كل الرواسب المعدنية خامات ، " فالخام " ore هو مصطلح اقتصادي ، بينما " الرااسب المعدني " هو مصطلح جيولوجي .

ويعتمد اعتبار المعدن (أو الصخر) خاما من عدمه على التركيب الكيميائي للخام ، ونسبة الفلز المستخرج وقيمة الفلز في السوق. فيعتبر معدن الهيماتيت (Fe_2O_3) خام حديد جيداً لأنه يحتوي على 70٪ من وزنه حديد ، وهذه نسبة عالية ومريحة لاستخراج الحديد عند الأسعار الحالية أما الليمونيت

6. التركيز بعمليات التجوية لتكون الرواسب المعدنية المتبقية residual mineral deposits .
ونعرض فيما يلي وصفا لكل من هذه الأنواع:

1. الرواسب المعدنية الصهارية

تعتبر عمليتي الانصهار الجزئي والتبلور التجزئى fractional crystallization طريقتين لفصل بعض المعادن عن بعضها البعض ، وخاصة التبلور التجزئى الذى يؤدى إلى نشأة رواسب معدنية مهمة. وهذه العمليات هى عمليات صهارية تماما، لذلك فإنه يشار إلى تلك الرواسب بأنها رواسب معدنية صهارية magmatic mineral deposits ، ومن أمثلة هذه الرواسب:

البجهايت: البجهايتات pegmatites هى صخور متداخلة خشنة الحبيبات بشكل غير عادى (أكبر من 1 سم) ذات تركيب جرانيتى غالبا ، وتوجد عادة على شكل عروق أو قواطع أو عدسات فى باثوليثات جرانيتية .

وتتكون البجهايت نتيجة التبلور التجزئى لصهارة جرانيتية تحتوى على تركيزات عالية من بعض الفلزات مثل الليثيوم والبريليوم والسيزيوم والتوبيسيوم واليورانيوم (Li, Be, Cs, Nb, U). ويتم تعدين معظم الليثيوم فى العالم من البجهايت مثل تلك الموجودة فى بيكيتا Bikita فى زيمبابوى. وهو أحد معادن خام البريليوم الرئيسية فى البجهايت .

الكروميت: يؤدى الاستقرار البلورى settling crystal إلى تكون رواسب معدنية مهمة ، وهو يحدث عندما ترسب المعادن التى تكونت مبكرا إلى غرفة صهارة أو جسم يبرد من الصهارة . وتكون هذه العملية مهمة فى الصهارة البازلتية المنخفضة اللزوجة عندما تتبلور فى غرفة صهارة كبيرة، حيث يكون أول

النحاس من 0.5 إلى 1٪ بسبب زيادة الإنتاج العالمى من النحاس المستخرج ، مما أدى إلى غلق عديد من المناجم .

المعادن الغثة: تكون معادن الخامات مثل السفاليريت والجالينا والكالكوبريت ، والتى يمكن استخراج الفلزات المطلوبة منها ، مختلطة بمعادن ليس لها قيمة اقتصادية يطلق عليها مصطلح المعادن الغثة gangue minerals (تنطق جانج) . ومن المعادن الشائعة التى توجد عموماً كمعادن غثة الكوارتز والفلسبار والميكا والكالسيت والدولوميت.

أ. أصل الرواسب المعدنية

تتكون الرواسب المعدنية نتيجة لعمليات جيولوجية، تؤدى إلى تركيز معدن أو أكثر فى الصخور . ويعتمد تصنيف الرواسب المعدنية على طبيعة العمليات التى يتم بها تركيز المعادن الرئيسية فى الرواسب .

ويتم تركيز المعادن بطرق عديدة من أهمها:

1. التركيز بالعمليات الصهارية فى جسم صخر نارى لتتكون الرواسب المعدنية الصهارية magmatic mineral deposits .

2. التركيز بمعاليل ساخنة تنساب عبر الكسور والفرغات والمسام فى صخور القشرة الأرضية لتتكون الرواسب المعدنية الهيدروترمية hydrothermal mineral deposits .

3. التركيز بعمليات التحول لتتكون الرواسب المعدنية المتحولة metamorphic mineral deposits .

4. التركيز بالترسيب من ماء بحيرة أو ماء بحر لتتكون الرواسب المعدنية الرسوبية sedimentary mineral deposits .

5. التركيز بالمياه السطحية فى الأنهار أو المجارى المائية عموماً ، أو على امتداد الشاطئ لتتكون رواسب الركيزة (المراقد) placer deposits .

غنية بالماس في رواسب طينية على بعد مئات الكيلومترات من أنابيب الكمبرليت حيث نقل بالأنهار التي التفتت كسرات تم تعريضها من الأنابيب ، ثم حملت مع الجارى المائية المناسبة.

2. الرواسب المعدنية الحرمائية

يحتوى عديد من المناجم الشهيرة في العالم على خامات تكونت نتيجة ترسيب الخامات من محاليل ساخنة تعرف بالمحاليل الحرمائية **hydrothermal** (hydro thermo كلمة مشتقة من **therme** وهى كلمة يونانية تعنى حرارة) . ومن المعلوم أنه من الصعب اكتشاف أصل المحاليل الحرمائية. فقد تنشأ بعض المحاليل من الصهارة نفسها عندما يتطلق الماء الذائب في الصهارة في الصخور المحيطة عندما تصعد الصهارة وتبرد. وتتكون بعض المحاليل الأخرى من مياه الأمطار أو من ماء البحر التي تدور وتتحرك بعمق في القشرة الأرضية. ويوضح شكل (21.17 ، 12.19) طريقة نشأة المحاليل الحرمائية نتيجة تحلل ماء البحر للقشرة المحيطة على امتداد الحيدود المحيطية ، حيث يسخن الماء ويصعد لأعلى بواسطة الحمل الدوراني **convection** ، ويتفاعل ماء البحر الساخن مع الصخور الملامسة له ، مما يسبب تغيرات كيميائية في كل من الصخور والمحاليل . وعندما تتفاعل المعادن ، فإن الفلزات الشحيحة مثل النحاس والزنك الموجودة في الصخور، تنطلق نتيجة الإحلال الأيوني وتصبح مركزة في ماء البحر الساخن . ونظرا لأن مصدر الحرارة لهذا النوع من المحاليل الحرمائية هو النشاط البركاني لحيدود وسط المحيط، كما أن معادن الخام المترسبة تكون دائما كبريتيدات، فإن رواسب المعادن المتكونة من تلك المحاليل تسمى واسب الكبريتيد الكتلية البركانية **volcanogenic massive sulfide** النشأة

المعادن التي تتكون هو معدن الكروميت **chromite** ، وهو معدن رئيسي لخام فلز الكروميوم . ويمكن أن يؤدي استقرار بلورات الكروميت العالية الكثافة على قاع غرفة الصهارة إلى تكون طبقات نقية تقريبا من الكروميت. ويتواجد الكروميت في مصر بصورة غير اقتصادية على هيئة كتل صغيرة وغير منتظمة عدسية الشكل داخل صخور السربيتينيت، في تتابعات الأوفوليت في جنوب الصحراء الشرقية (مثل مناطق جبل المقسم وأم الطيور ووادي العلاقي وأبو زهر ووادي غدري) . ويأتي معظم إنتاج العالم من الكروم والبلاتين من متداخل واحد ضخم هو البوشفيلد **Bushveld Complex** في جنوب أفريقيا. وفي مونتانا، تحتوي جده موازية ضخمة من ماقبل الكمبري تسمى معقد ستيل وتر **Stillwater Complex** على رواسب معدنية مماثلة تحتوى على فلزى الكروم والبلاتين ولكن بدرجة أقل.

الكمبرليت: يتواجد الماس وهو أكثر المعادن صلابة، في صخور نارية فوققافية تسمى كمبرليت **kimberlites**، من اسم مدينة كمبرلى **Kimberley** في جنوب أفريقيا ، حيث توجد تلك الصخور. وقد تداخلت تلك الصخور إلى سطح الأرض من الأجزاء العميقة في القشرة الأرضية أو الوشاح العلوى على هيئة أنابيب ضيقة وطويلة . وقد أوضحت التجارب المعملية أن صخور الكمبرليت الحاملة للماس نشأت عند أعماق كبيرة ؛ لأن الماس الموجود فيها يتكون فقط تحت ظروف من الضغط العالى جدا الذى يوجد في الوشاح. وينشأ الكمبرليت إلى سطح الأرض بسرعة عالية، تحت قوة دفع المتطاريات المضغوطة ، مثل بخار الماء وثاني أكسيد الكربون . وبالطبع لم ير أحد عملية انبثاق الكمبرليت . وقد شبهها أحد الجيولوجيين بطلقة من بندقية ، اندفعت من الوشاح خلال الغلاف الصخرى إلى سطح الأرض. وقد وجدت تراكبات

- الرواسب المعدنية المنشورة: قد تتكون من المحاليل الحرمائية ورواسب معدنية في صورة متناثرة ومبعثرة في الصخور. وهنا يكون حجم الصخور أكبر بكثير من حجم العروق، وتعرف تلك الرواسب بالرواسب المعدنية المنشورة **disseminated mineral deposits**.

deposits. وتتبع كثير من رواسب النحاس في العالم الرواسب المنشورة (وتسمى أيضا رواسب النحاس البورفيرى **porphyry copper deposits** لأن البلوتون المصاحب يكون عادة ذا نسيج بورفيرى). ويرسب مع النحاس عديد من الفلزات الأخرى، مثل الرصاص والزنك والموليبدنم والفضة والذهب (وكذلك الحديد ولكن بكميات غير اقتصادية). وتتواجد رواسب النحاس البورفيرى في مصر بالصحراء الشرقية بمنطقتي حش وأم جريات.

- رواسب الينابيع الحارة: عندما تصعد المحاليل الحرمائية إلى سطح الأرض فإنها تكون الينابيع الحارة **hot springs**. وقد تحتوى هذه الينابيع الحارة على كميات كبيرة من الفلزات الذائبة، وتحتوى بعض الينابيع الحارة في كاليفورنيا على كميات كبيرة من الزئبق بحيث يكون الماء غير مناسب للشرب، ومن أهم الينابيع الحارة تلك الموجودة على قاع البحر، والتي يمكن أن ترسب أحجاما كبيرة من الكبريتيدات الفلزية بكميات كبيرة.

الرواسب المعدنية الحرمائية المتكونة حاليا

حدث أول اكتشاف للرواسب المعدنية الحرمائية المتكونة حاليا بالصدفة عام 1962م، فحتى ذلك الوقت لم يكن أحد يعرف أين يبحث عن المحاليل الحرمائية الحديثة. فقد اندهش الحفاريون أثناء البحث عن البترول في أمبريال فالى Imperial Valley في جنوب كاليفورنيا عندما اخترقوا أجاج (ماء ملوح مر) **brine** تبلغ درجة حرارته 320°C على عمق 1.5 كم.

deposits. وأيا كانت الطريقة التى تكونت بها المحاليل الحرمائية، فإنها تصنف عموما إلى ثلاثة أنواع من رواسب الخامات الحرمائية وهى: العروق الحرمائية والرواسب المعدنية المنشورة ورواسب الينابيع الحارة.

- العروق الحرمائية: تعرف العروق الحرمائية **hydrothermal veins** بأنها أجسام خام عديدة السمك مسطحة (نضيدية) الشكل تكونت على امتداد الكسور والفواصل والصدوع وأسطح التطبيق في الصخور الرسوبية وأسطح التورق **foliation** في الصخور المتحولة (شكل 7.19). ويمكن أن يتكون الخام من السوائل التى تنساب في الفراغات على امتداد الكسور. وقد يحل الخام محل الصخور المحيطة بجدران الكسور. وتكون العروق الحرمائية عديدا من الرواسب المعدنية في العالم من الرصاص والزنك والفضة والذهب والتنجستن والقصدير والزئبق، وفي بعض الأحيان النحاس.



شكل (7.19): عروق صغيرة من معدن الماغنيزيت تملأ الكسور في صخور السربنتين، وادى أم غيج - الصحراء الشرقية - مصر.

الصخور المحيطة . وقد كان اكتشاف أجاج البحر الأحمر مدهشا، عندما اكتشف أن الرواسب عند قاع أحواض الأجاج تحتوي على رواسب معدنية مثل الكالكوبيريت والجالينا والسفاليريت. وبمعنى آخر، فقد اكتشف علماء البحار رواسب معدنية حديثة مقيدة الطباقية **stratabound** أثناء تكوينها ، أى رواسب يقتصر وجودها على وحدة استراتجرافية معينة .

3. الرواسب المعدنية المتحولة

يمكن أن يؤدي التحول التماسى (الحرارى) **metamorphism (thermal)** contact إلى نشأة رواسب التنجستن والنحاس والرصاص والزنك والفضة وفلزات أخرى في الصخور المحيطة ، حيث يزال الصخر كليا أو جزئيا ثم يحل الراسب مكانه . ويحدث ذلك عندما تتفاعل طبقات من الحجر الجيري مع المحاليل الخرسائية فتتكون أجسام خامات كبيرة وغنية جدا . ومن أهم أمثلة الرواسب المعدنية المتحولة رواسب مارى كاثلين الأسترالية .

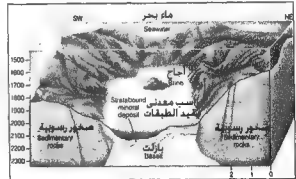
4. الرواسب المعدنية الرسوبية

تشتمل الرواسب المعدنية الرسوبية **sedimentary mineral deposits** على بعض أهم مصادر المعادن في العالم. ويتجمع عديد من المعادن الهامة اقتصاديا بالعوامل الكيميائية أو الطبيعية في العمليات الرسوبية ، ومن الرواسب المعدنية الرسوبية رواسب المتخثرات ورواسب الحديد والرواسب المعدنية مقيدة الطباقية .

رواسب المتخثرات: تتكون رواسب معدنية رسوبية مباشرة عندما يتبخر ماء بحيرة أو بحر. وتسمى طبقات الملح الذى يترسب نتيجة التبخر برواسب المتخثرات **evaporite deposits** . وهى تشمل الأملاح التى تترسب من مياه البحيرات التى تحتوى على كربونات الصوديوم (Na_2CO_3) أو كبريتات الصوديوم

وعندما انساب الأجاج إلى أعلى، فإنه يبرد وترسب المعادن من المواد الذاتية في السوائل . ورسب البثر على امتداد ثلاثة أشهر ثمانية أطنان من المعادن السيليكية التى تحتوى على 20٪ من وزنها نحاس و 8٪ من وزنها فضة . وهكذا وجد الحفاريون أن محلولاً حرماثياً رسب راسبا معدنيا غنيا تحت ظروف مناسبة ، وهذا الاكتشاف يدل على أن الحاضر مفتاح الماضي .

أما الاكتشاف الثانى فقد حدث عام 1964 م ، حين اكتشف علماء البحار سلسلة من أحواض الأجاج الساخن والعالى الكثافة على قاع البحر الأحمر . وقد وجدت أحواض الأجاج في الأخدود الذى تكون نتيجة مركز الانتشار بين اللوحين العربى والأفريقى المتباعدان (شكل 8.19) . وقد اكتشف العلماء أن ذلك الأجاج صالح للغاية وأكثر كثافة من ماء البحر، ولذلك فإنه يبقى في الأحواض في الأخدود ، على الرغم من أن درجة حرارة السوائل تصل إلى حوالى 60° م . وقد اكتشف عديد من تلك الأحواض الآن .



شكل (8.19): راسب معدنى مقيد الطبقات **stratabound mineral deposit** .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

ويصعد أجاج البحر الأحمر على امتداد الصدوع العادية المصاحبة للخصيف الأوسط في مركز الانتشار، حيث وصل الأجاج إلى تركيبه الحالل خلال التفاعل مع

قابل للذوبان (Fe^{3+}) ثم ترسب . وقد ترسب الحديد في العديد من تلك الأحواض في صورة طبقات رقيقة متبادلة مع طبقات من رسوبيات غنية بالسيليكا تسمى التشرت chert. ويسمى هذا النوع من خامات الحديد باسم متكونات الحديد الشريطي (BIF banded iron formations). وتعتبر رواسب حديد البحيرات العظمى في كندا وأمريكا من هذا النوع ، والتي تعتبر المصدر الأساسي لصناعة الحديد والصلب في الولايات المتحدة الأمريكية . ولذلك يعرف هذا النوع من رواسب الحديد بأنه من طراز ليك سوبريور Lake Superior type. وتواجد رواسب الحديد من طراز ليك سوبريور في الأحواض الرسوبية فوق كل رسيخة craton ؛ خاصة في لابرادور وفينزويلا والبرازيل ، والاتحاد السوفيتي سابقا وجنوب أفريقيا وإستاليا.

ويعتقد بعض الجيولوجيين أن بعض متكونات الحديد الشريطي تنشأ نتيجة نشاط بركاني في عدد من الأحواض المنفصلة المتواجدة بين أقواس الجزر البركانية ، حيث تتواجد كمكونات قليلة الامتداد وطبقات قليلة السمك . ويعرف هذا النوع من رواسب الحديد بأنه من طراز ألوما Algoma type.

ويعتبر بعض الجيولوجيين أن رواسب الحديد الشريطي بالصحراء الشرقية بمصر (مثل مناطق أبو مروات وأم نار ووادي كريم ووادي الدباح وجبل الحديد) من طراز ألوما ، حيث تتواجد رواسب الحديد في تلك المناطق على شكل طبقات وعدسات من الماجنييت والماريت وهيماتيت قليلة السمك (عدة سنتيمترات إلى 10 أمتار) ، وفي تتابعات من صخور ما قبل الكامبري ، وحيث تعرضت تلك التتابعات لتحول منخفض الرتبة (شكل 9.19). كما تتميز رواسب الحديد تلك بانتشار الطي والصدوع .

(Na_2SO_4) أو البوراكس ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) . وقد تم تعدين البوراكس والمعادن الأخرى المحتوية على البورون من رواسب المتبخرات في البحيرات في كاليفورنيا والأرجنتين وبوليفيا وتركيا والصين ووادي النظرون في مصر .

وتعتبر المتبخرات البحرية المتكونة نتيجة تبخر ماء البحر، أكثر شيوعا وأهمية من متبخرات البحيرات . ومن الأملاح المترسبة من ماء البحر الجبس ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) والهاليت (NaCl) والكارناليت carnallite ($\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) . ويؤدي تحول رواسب المتبخرات البحرية عند درجات التحول المنخفضة إلى تكون معدن آخر مهم هو السيلفيت sylvite (KCl) . ويستخلص من المتبخرات البحرية معظم ملح الطعام الذي نستخدمه في حياتنا اليومية ، بالإضافة إلى الجبس المستخدم كجص والبوتاسيوم المستخدم في أسمدة النباتات.

رواسب الحديد: تتشر رواسب الحديد الرسوبي على نطاق واسع ، ويكون متوسط كمية الحديد في ماء البحر صغيرا إلى حد أن تلك الرواسب لا يمكن أن تكون قد تكونت من ماء بحر يشبه تركيبة ماء البحر الحالي.

ويوجد أكبر خامات الحديد حجما في صخور رسوبية تتبع ما قبل الكامبري (البروتروزوي المبكر أي قبل 2 بليون سنة أو أكثر)، حيث كان الغلاف الجوي للأرض فقيرا في الأكسجين في هذا التاريخ المبكر. ويعتقد الآن أن تواجد الأكسجين بنسبة منخفضة سمح بانتشار الحديد في صورة ذائبة، في شكل جزئيء الحديدوز (Fe^{2+}) حيث تم غسله وإزالته بكميات كبيرة من سطح الأرض. ولقد تم نقل الحديد (Fe^{2+}) في السوائل بواسطة المياه السطحية إلى بيئات بحرية واسعة وضحلة ، حيث تأكسد إلى جزئيء حديد غير

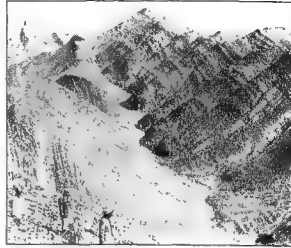
5. رواسب الرقيقة (المراقد)

ناقشنا فيما سبق الطريقة التي يمكن أن يصبح بها معدن ذو وزن نوعي عالٍ مُركّزًا بالمياه المنسابة. وتسمى رواسب المعادن ذات الوزن النوعي العالي التي يتم تركيزها ميكانيكياً من المجرى المائية بسرعة أكبر من المعادن الأخف مثل الكوارتز والفلسبار برواسب الرقيقة (المراقد) **placer deposits**. وأهم المعادن التي يتم تركيزها في المراقد الذهب والبلاستين والكاسيتريت (SnO_2) والماس والزيروكون. ويوضح شكل (10.19) أهم مواقع رواسب المراقد، والتي توجد خلف حواجز صخرية أو في حفرة في صخر الأساس على امتداد قنوات المجرى المائية وتحت مساقط المياه وداخل المنعطفات في المجرى المائية وكذلك عند نقطة التقاء رافد بمجرى مائي رئيسي.

ويمكن أحياناً تتبع رواسب الرقيقة (المراقد) في اتجاه أعلى النهر إلى موقع الراسب المعدني الأصلي، والتي تكون عادة ذات أصل ناري، حيث تم تعرية المعادن منها. ولقد أدت تعرية عديد من العروق الحاملة للذهب الموجودة على الجانب الغربي لجبال سيرا نيفادا، إلى تكون رواسب الرقيقة التي اكتشفت عام 1848م، وأدت إلى جنون الذهب المعسوف في كاليفورنيا. ولقد تم اكتشاف رواسب الرقيقة أولاً ثم اكتشف مصدرها لاحقاً. ولقد أدى اتباع المنهج نفسه إلى اكتشاف مناجم الماس في كيمبرلي في جنوب أفريقيا منذ مائتي عام.

6. الرواسب المعدنية المتبقية (المتخلّفة)

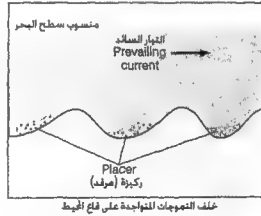
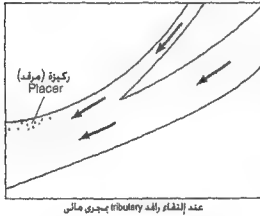
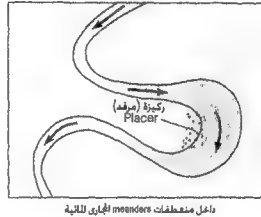
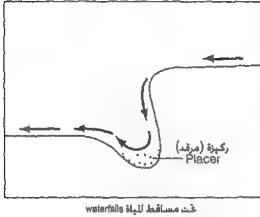
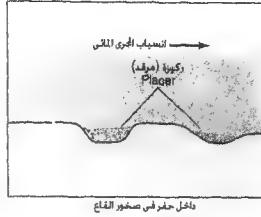
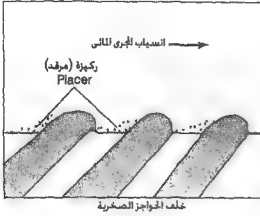
تحدث التجوية عندما يتعرض صخر منكشف حديثاً وغير مستقر كيميائياً ماء المطر والغلاف الجوي، وتؤدي التجوية الكيميائية إلى إزالة المواد الذاتية في المحلول وتركيز المعدن المتبقى الأقل ذوباناً. ويعتبر اللاتيريت **laterite** مثلاً شائعاً على راسب معدني



شكل (9.19) : متكون الحديد الشريطي **Banded Iron Formation**، حيث توجد طبقات قليلة السمك (رقيفة) من الحديد متداخلة مع الشست بمنطقة أم نار - الصحراء الشرقية - مصر. (أ.د. عمود فوزي الرمل - هيئة المساحة الجيولوجية).

الرواسب المعدنية محصورة الطباقية: توجد بعض خامات الرصاص والزنك والنحاس في العالم في الصخور الرسوبية. وتوجد تركيزات معادن الجالينا والسفاليريت والكالكوبريت والبيريت في طبقات رقيقة منتظمة تبدو كالرواسب، ويحصر وجودها في جزء محدد من التابع الطبقي الذي تنتمي إليه وتكون موازية للطبقات فيه، ولذلك تسمى بالرواسب المعدنية محصورة الطباقية **stratabound mineral deposits**. وتشبه تلك الرواسب المعدنية الرسوبية، ويعتقد أنها نشأت نتيجة تغيرات ما بعد الترسيب **diagenesis**.

وتتكون الرواسب المعدنية محصورة الطباقية عندما يغزو محلول حرماي راسب دقيق الحبيبات ويتفاعل معها، ويتسبب التفاعل بين حبيبات الراسب والمحلول في ترسيب معادن الخامات، حيث يحدث الترسيب عادة قبل أن يتحول الراسب إلى صخر رسوبي. وتعتبر رواسب النحاس المشهورة في زامبيا ورواسب كوبفرشيفر في ألمانيا وبولندا خامات محصورة الطباقية.



شكل (10.19): تتواجد رواسب الركيزة (المرقد) placer deposits حينما تسمح الحواجز للماء المتدفق أو المنساب أن يعمل الجمولة المعلقة من الحبيبات خفيفة الوزن بعيدا، بينما يجبر الحبيبات ذات الوزن الكبير المتواجدة في جمولة القاع.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

الكيميائية . ويتم غسل وإزالة معظم المعادن من التربة ببطء في المناطق القارية الدافئة وتحت الأمطار الشديدة، حيث تترك قشرة من اللايتريت غير الذائبة تشمل الليمونيت الغني بالحديد . وفي مناطق قليلة مثل

متبق residual mineral deposit تكون نتيجة الإثراء بالتجوية. حيث يتم تركيز عنصري الحديد والألمنيوم . والليمونيت ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$) هو أحد خامات الحديد الأقل ذوبانا التي تتكون بسبب التجوية

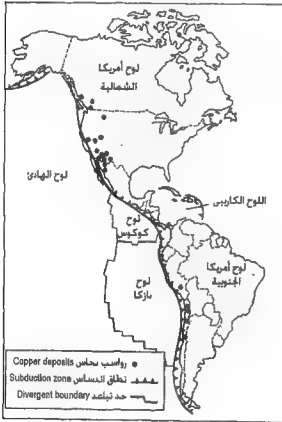
جنوب أفريقيا قد تكون رواسب اللاتيريت غنية بالحديد بدرجة تكفي لاستخدامها كخام حديد.

تعتبر الموارد اللافلزية موارد جيولوجية في مجالات غير استخراج الفلزات أو كمصدر للطاقة، وتحتوى معظم الصخور والمعادن على فلزات، ولكن عندما يتم استخراج الموارد اللافلزية، فإنه يتم استخدام الصخر أو المعدن كما هو (مثل استغلال الرمل والحصى لأغراض البناء)، بينما يتم استخراج الفلز في الخامات الفلزية بعد إجراء بعض عمليات الفصل والتركيز. والموارد اللافلزية رخيصة الثمن عموماً، ويتم استخدامها بكميات كبيرة، باستثناء الأحجار الكريمة

وعلى الرغم من أن رواسب اللاتيريت الغنية بالحديد هي أكثر أنواع اللاتيريت شيوعاً، إلا أن رواسب اللاتيريت الغنية بالألومنيوم والمسماة بالبوكسيت **bauxites** هي أيضاً من أنواع اللاتيريت المهمة خاصة للاستغلال الاقتصادي. ويتكون البوكسيت نتيجة غسل وإزالة معادن الصلصال. وهي عملية يتم فيها إزالة السيليكا من الصخور ويبقى معدن الجبسيت $Al(OH)_3$ كراسب متبقى. ورواسب البوكسيت الغنية بالجبسيت هي أهم مصادر الألومنيوم في العالم. ويشير تواجد رواسب البوكسيت في الوقت الحالى في مناطق معتدلة المناخ، مثل فرنسا والصين والمجر، أن المناخ كان قارياً عندما تكونت رواسب البوكسيت.

ب. أقاليم التمعدين

تمثل أنواع من الرواسب المعدنية للتواجد في مجموعات، وتكون ما يطلق عليه جيولوجيو الاستكشاف أقاليم التمعدين **metallogenic provinces** وتعرف تلك الأقاليم بأنها مناطق محدودة من القشرة الأرضية يتواجد فيها رواسب معدنية بأعداد كبيرة. ويوضح شكل (11.19) مثالا لإقليم تمعدن يتواجد على امتداد الجانب الغربى للأمريكتين الشمالية والجنوبية. ويوجد في إقليم التمعدين هذا أكبر تركيز في العالم من رواسب النحاس الحزامية. وتكون الرواسب مصاحبة لصخور نارية متداخلة ذات نسيج بورفيرى، ولذلك فإنها تسمى رواسب النحاس البورفيرى **porphyry copper deposits** ويعتقد أن الصخور النارية المتداخلة، وبالتالي الرواسب المصاحبة لها، قد تكونت نتيجة الاندساس **subduction**.



شكل (11.19): تواجد رواسب نحاس مهمة (رواسب النحاس البورفيرى **porphyry copper deposits**) على امتداد الساحل الغربى للأمريكتين الشمالية والجنوبية.

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

يتكون من تراكم وتغير بقايا الكائنات العضوية. ويمكن أن تتكون النيترات ومركبات البوتاسيوم مباشرة بالتبخير.

ويستخرج الملح الصخري rock salt الذى يتكون من معدن الهاليت من رواسب المتبخرات. ويستخدم الملح الصخري في حفظ الطعام والمساعدة في إزالة الثلج من الطرق في الأماكن الباردة في الشتاء، وفي إعدادات ملح الطعام وتصنيع حمض الهيدروكلوريك والصابون والعديد من المنتجات الأخرى. ويستخدم الملح الصخري في الصناعة على نطاق واسع. ويتكون الجبس gypsum أيضاً كأحد رواسب المتبخرات، وهو أحد المكونات الرئيسية للجبس والألوان الجدارية وفي صناعة البناء عموماً وغيرها من الاستخدامات الأخرى.

ويتواجد الكبريت sulfur في حالة عنصرية في رواسب صفراء زاهية. ويأتى معظم الكبريت المستخدم بصورة تجارية من الصخور المتواجدة فوق القباب الملحية. ويستخدم الكبريت بصورة كبيرة في الزراعة كمبيد للفطريات وكمخصب. كما يستخدم في تصنيع حمض الكبريتيك وإعداد الثقاب والعديد من المنتجات الأخرى.

جـ. المواد اللافلزية الأخرى

تشمل الأحجار الكريمة gemstones (وتسمى بعد تقطيعها وصقلها جواهر أو أحجار gems) الأحجار الثمينة مثل الماس diamond والياقوت rubies والزمرد emerald والسافير saphires بالإضافة إلى المعادن شبه الكريمة semiprecious stones مثل البريل والجارنيت والسينيل والتوباز والزيركون. ويستخدم الماس في أدوات الحفر ومناشير تقطيع الصخور.

مثل الماس والياقوت. مما يعنى أن تلك الموارد يجب أن يتم استخدامها محلياً، نظراً لأن النقل لمسافات طويلة يضيف أعباء مالية على سعر الختام، ومن أمثلة هذه الموارد مواد البناء والمخصبات والمتبخرات بالإضافة إلى بعض المواد الفلزية الأخرى.

أ. مواد البناء

يتم استخدام الرمل والحصى في الخرسانة اللازمة لأعمال البناء وإنشاء الطرق السريعة. كما يستخدم الرمل أيضاً في الملاط (المونة) اللازم للحم الطوب أو البلوكات الأسمنتية. وتعتبر الكثبان الرملية والأنهار ورواسب الشواطئ ضمن المصادر الرئيسية للرمل والحصى. كما تستخرج أيضاً من المخاريط البركانية. ويستخرج الرمل والحصى من حفر سطحية تعرف بالمحاجر quarries.

ويشير مصطلح أحجار stones إلى الصخور التى تستخدم كبلوكات في أعمال البناء مثل الجرانيت، وأيضاً الحجر الجيري المستخدم في إنشاء الطرق. وتستخرج الأحجار من المحاجر أيضاً. ويستخدم الحجر الجيري في عدد من الأغراض إضافة إلى استخدامه في البناء أو في رصف الطرق، حيث يستخدم في صناعة الأسمنت، كما يستخدم الحجر الجيري المطحون في تحسين مواصفات التربة، وكمكون رئيسي في العديد من المنتجات الكيميائية.

ب- المخصبات والمتبخرات

تعتبر المخصبات fertilizers (مركبات الفوسفات والنيترات والبوتاسيوم) من أهم المواد اللازمة للزراعة في الوقت الحالى، حيث تنقل لمسافات طويلة عبر البحار نظراً لأهميتها. وينتج الفوسفات من الفوسفوريت phosphorite، وهو صخر رسوبي

تواجد رواسب الخامات الحالية ، كما يساعد في عمليات الاستكشاف المعدني .

فقد اكتشف الجيولوجيون عام 1979م وجود ينابيع حارة محملة بمعادن ذاتية تخرج من عدة مخارج على قاع البحر أثناء دراستهم لقاع المحيط عند مركز انتشار spreading center مرتفع شرق الهادئ East Pacific Rise . ويرجع أصل تلك الينابيع الحارة إلى ماء البحر الذي يدور في الكسور بالقرب من الخسف ، حيث تفصل الألواح على امتداد حيود وسط المحيط (شكل 12.19) . وترتفع درجة حرارة ماء البحر إلى عدة مئات من الدرجات حينها يلامس الصهارة أو الصخور الساخنة الموجودة في أعماق القشرة . ويقوم ماء البحر الساخن بغسل وإزالة العناصر الشحيحة من الصخور الساخنة ويصعد إلى قاع البحر . وترسب حبيبات دقيقة من كبريتيد الحديد وغيره من المعادن عندما تصل المياه الساخنة المحملة بالعناصر والمركبات الذاتية إلى القشرة العلوية الأكثر برودة ومياه المحيط القريبة . وهذا هو أصل المدخن السوداء black smokers الموضحة في شكل (13.19) . وترسب هذه الطريقة كميات كبيرة من كبريتيدات الخامات الغنية في الزنك والنحاس والحديد والفلات الأخرى ، على امتداد مراكز انتشار وسط المحيط .

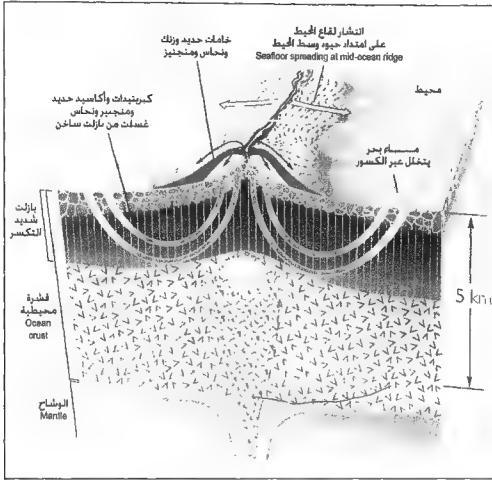
وعندما تم تعرف مراكز الانتشار الشائعة في البحار كمصدر للرواسب المعدنية، بدأ الجيولوجيون في البحث فوق اليابسة عن بقايا قيعان البحار القديمة، التي ربما تحتفظ أيضاً بموارد مهمة للرواسب المعدنية. وقد توجد بعض الرواسب في نطاقات تصادم الألواح (الحدود المتقاربة) ، حيث قد توجد بعض أجزاء من قشرة محيطية قديمة دفعت فوق اليابسة، على امتداد أسطح دسر thrust surfaces في مرحلة من مراحل

والأسبستوس asbestos أحد أنواع السربنتين الموجود في صورة ألياف يمكن فصلها ونسجها في أقمشة واقية من النيران . ولذا فإنه يستخدم في صناعة ملابس مكافحة النيران وستائر المسارح . كما يستخدم الأسبستوس في صناعة العوازل الصوتية وعمل الأسقف ، على الرغم من تقلص استخدامه حالياً لارتباطه ببعض الأمراض الخبيثة في الرئة . ويستخدم التلك talc الذي يوجد غالباً مصاحباً للأسبستوس في صناعة بودرة التلك ومنتجات أخرى .

وتستخدم الموارد اللافلزية أيضاً في أغراض متنوعة ؛ حيث تستخدم الميكا mica في صناعة العوازل الكهربائية ، بينما يستخدم الباريت barite (BaSO_4) نظراً لوزنه النوعي العالي في منع تدفق البترول أثناء عمليات الحفر . ويستخدم الصلصال clay في صناعة السيراميك والمرشحات . ويستخدم الدياتومييت diatomites في صناعة مرشحات أحواض السباحة وفي عمليات الترشيع عموماً . ورمال الزجاج glass sand التي تحتوي على أكثر من 95٪ من وزنها كوارتز هي المكون الرئيسي للزجاج ، ويستخدم الجرافيت graphite في سبك المعادن وفي المواد المخففة للاحتكاك وصناعة الصلب والبطاريات وأقلام الرصاص .

VII. رواسب الخامات وتكتونية الألواح

تشرح نظرية تكتونية الألواح الأنواع المختلفة من النشاط الناري نتيجة التفاعلات عند حدود الألواح ، حيث تنفصل الألواح أو تتقارب . وحيث إن العمليات النارية تقلل العناصر الكيميائية والمعادن المتكونة فيها من داخل الأرض إلى سطحها، فإن نظرية تكتونية الألواح تقدم أساساً مهماً لفهم نشأة الرواسب المعدنية . ويساعد هذا الفهم في شرح أسباب



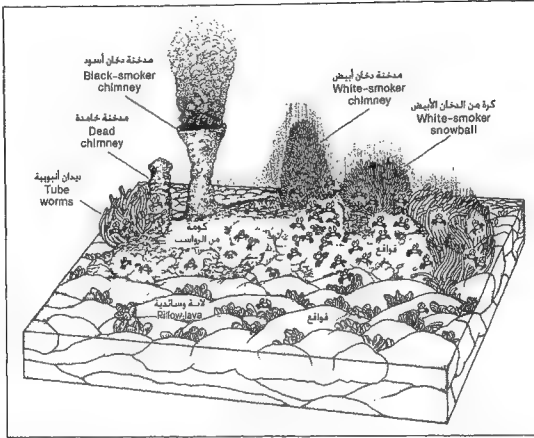
شكل (12.19) : يسخن ماء البحر البارد الذي يتخلل كسور الصخور البركانية عند حيد وسط المحيط، عندما يقترب من غرفة الصهارة المتواجدة أسفل حيد وسط المحيط . وتنقل السوائل الساخنة العناصر المختلفة من صخر البازلت وتصعد إلى قاع المحيط ، وعندما تخرج السوائل الساخنة مع ما تحمله من عناصر ذائبة إلى ماء قاع المحيط البارد ، ترسب للمعادن الذائبة في السوائل في صورة كبريتيدات وأكاسيد غنية في عناصر الحديد والزنك والنحاس وعناصر الخامات الأخرى .

(After Press, F. and Slevor, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

عند حدود تقارب (تصادم) حديثة أو قديمة. وتشمل تلك الرواسب تلك الموجودة في كورديليرا في أمريكا الشمالية والجنوبية وفي شرق البحر الأبيض المتوسط إلى باكستان ، وفي جزر الفلبين واليابان . ويلاحظ شكل (14.19) الارتباط بين بعض الرواسب المعدنية وتكونية الألواح. ويعتقد أن الرواسب الموجودة في الأقواس الصهارية magmatic arcs تنتج من نشاط نارى يقع في نطاقات التقارب. وتقتصر إحدى الفرضيات أن بعض رواسب حدود التقارب تمثل

تصادم الألواح والاندساس تعرف بالأوفيوليت ophiolites. وربما يرجع أصل رواسب الكبريتيدات الغنية بالنحاس والرصاص والزنك في تتابعات الأوفيوليت في سلطنة عمان وقبرص والفلبين وإيطاليا وفي أماكن أخرى من العالم، إلى عملية دوران المياه الحرماية على امتداد نطاقات خسف وسط المحيط القديم.

ويوجد عديد من رواسب خامات كبريتيدية أخرى يرجع أصلها إلى المحاليل الحرماية أو النشاط النارى



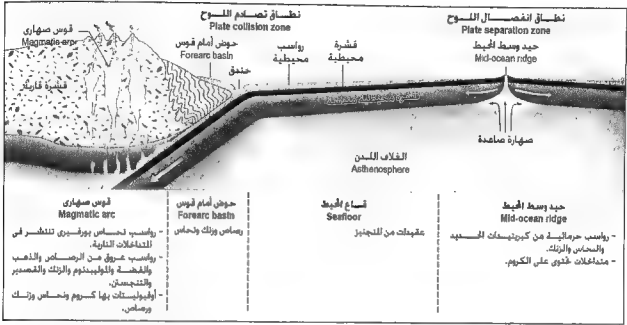
شكل (13.19): شكل نموذجي لرواسب الكبريتيدات الفلزية للكائنات الحية عند ينبوع ساخن تحت الماء على عمق 2500 متر على امتداد نطاق الحنف rift zone المرتفع شرق الهادي East Pacific Rise ، وتنساب بعض هذه المياه الساخنة إلى سطح البحر عبر تراكيب تشبه للدخان مكونة الكبريتيدات وغيرها من المعادن ، والتي ترسب عندما تبرد المياه . ويقدم الذي الواسع من الظروف الكيميائية والحرارية تحت مستوى سطح البحر بيئات متنوعة للحياة .

(After Decker, R. and Decker, B., 1997: Volcanoes. 4th edition. W. H. Freeman and Company, New York).

والزنك والقصدير والذهب على امتداد حدود الألواح المتقاربة ، والتي نشأت من النشاط الحرماثي ثم يعاد تركيزها بالعمليات النارية نتيجة حركات تكتونية الألواح.

وربما يكون قاع البحر البعيد عن حدود الألواح هو المكان الأفضل للتعدين في مياه البحار العميقة، بسبب التواجدات المنتشرة لعقيدات المنجنيز manganese nodules ، وهي عقيدات هشة سوداء غير منتظمة الشكل تشبه حبات البطاطس تحتوي على أكاسيد المنجنيز ، وكميات أصغر من أكاسيد وهيدروكسيد

المرحلة الثانية من عملية تكون الخام التي تشمل مرحلتين. المرحلة الأولى هي نشأة خامات معدنية بواسطة نشاط حرماثي عند مركز انتشار وسط المحيط. وتشمل المرحلة الثانية، وهي منفصلة عن المرحلة الأولى زمانا ومكانا ، اندساس رواسب وقشرة محيطية تحتوي على عناصر الخامات التي سبق تركيزها عند نطاق تقارب (تصادم). وعندما يهبط اللوح في مناطق الوشاح التي تزداد درجة حرارتها حيث تنصهر الفلزات وترتفع في اللوح الراكب مصاحبة للصهارة. ويوجد الحديد والنحاس والموليبدينم والرصاص



شكل (14.19): الدور الذي تلعبه حدود الألواح في تراكم الرواسب المعدنية . تزيد نسبة الفلزات في القشرة المحيطية والرواسب التي تغطيها نتيجة الترسيب من المحاليل الحرارية على امتداد حيد وسط المحيط . وتكون الصهارة الصاعدة في نطاق الاندساس subduction zone مصدرًا للحمات التي تكون إقليم التمدلن الحزام الصهاري مثل الكوردييرا في أمريكا الشمالية والجنوبية . وقد يساهم انصهار الرواسب والقشرة الحابطة المترسبة في تكوين الحام ، وتندفع أجزاء القشرة المحيطية (أوفيوينات) الحاملة للمعادن فوق القارة في نطاق التصادم collision zone .

رواسب الحامات توجد على القارات أو بقايا لأجزاء متمعدنة من قشرة محيطية فوق القارات عند تقارب (تصادم) الألواح.

الملخص

1. الموارد الجيولوجية هي مواد مهمة ذات أصل جيولوجي ، تستخرج من الأرض وتشمل موارد الطاقة وموارد الفلزات والموارد اللافلزية .
2. الاحتياطيات هي الرواسب المكتشفة المعروفة التي يمكن استخراجها بطريقة اقتصادية وقانونية . أما الموارد الطبيعية فتشمل الاحتياطيات بالإضافة إلى الرواسب المكتشفة وغير المكتشفة بعد ، والتي يمكن استخراجها بصورة اقتصادية في المستقبل .
3. يستخدم لفظ البترول كمصطلح عام يشمل الزيت الحام والغاز الطبيعي . ويتواجد البترول في المناطق

الحديد والنحاس والنيكل والكوبالت وأكاسيد فلزات أخرى . ويكون حجم العقيدات في حدود عدة سنتيمترات قليلة . وتتكون تلك العقيدات من ترسيب أكاسيد تلك الفلزات من ماء البحر ، حول نويات صغيرة مثل أسنان سمك القرش أو أجزاء من الصخر . ولا ترجع فقط القيمة الاقتصادية لتلك العقيدات إلى النقص التدريجي في رواسب المنجنيز عالية التركيز على اليابسة ، وإنما إلى أن تلك العقيدات غنية أيضا بعدد من الفلزات الأخرى . وتقدر تلك الرواسب بـ 100 بليون الأطنان .

ويستعرض هذا الملخص الموجز لـ جيولوجية الرواسب المعدنية التنوع الكبير للمواقع الجيولوجية التي تحتوي على أنواع معادن مختلفة ذات قيمة اقتصادية . وعلى الرغم من أن هناك احتمالا لانتشار أجسام خامات على قيعان البحار العميقة ، إلا أن معظم

7. تتكون رواسب الركيزة (المكثف) نتيجة تركيزها ميكانيكياً من المجارى المائية بسرعة أكبر من المعادن الأخف ، بينما تتكون الرواسب المعدنية المتبقية نتيجة التجوية الكيميائية وإزالة المواد الذائبة في المحلول ، مما يؤدي إلى تركيز المعادن المتبقية الأقل ذوباناً. وتعتبر اللاتيريت والبوكسيت من أهم أمثلة الرواسب المعدنية المتبقية.

8. تتكون الخامات الفلزية من النبايع الساخنة عند حدود الألواح المتباعدة، وعلى جوانب أقواس الجزر، وفي أحزمة عند حواف القارات فوق نطاقات الاندساس .

9. الفلزات أحد العناصر الرئيسية المهمة في الصناعة، خاصة الحديد لإنتاج الصلب والنحاس للتجهيزات والمعدات الكهربائية.

10. تستخدم الموارد اللافلزية مثل الرمل والحصى والحجر الجيري بكميات كبيرة. كما تستخدم أيضاً المخصلات والملح الصخري والجبس والكبريت والصلصال على نطاق واسع .

التي تتحقق فيها ثلاثة شروط ، وهى: وجود صخور مصدر يمتص على مواد عضوية، حيث يؤدي الدفن وتغيرات ما بعد الترسيب إلى تكون البترول والنضوج الحراري، وصخور خزان ، ومصادر للزيت (مثل الطيات المحدبة والصدوع والمصادر الاستراخرافية والقباب الملحية) .

4. قد يحل الغاز الطبيعي والخام الثقيل ورمل الزيت وطفل الزيت محل البترول السائل في المستقبل.

5. يعتبر الفحم أحد مصادر الطاقة الرئيسية بعد الزيت والغاز الطبيعي. ويستخدم الفحم حالياً في توليد الكهرباء، وقد يزيد استخدامه في المستقبل مع ارتفاع أسعار البترول.

6. توجد الخامات الفلزية ، والتي يمكن استخراجها من الرواسب المعدنية بصورة مربحة، مصاحبة للصخور النارية ، والرواسب المشورة ورواسب النبايع الحارة المتواجدة فوق سطح الأرض وتمتد الماء . ويتجمع عديد من المعادن المهمة اقتصادياً بواسطة الانصهار الجزئي والتبلور التجزيئي ، وهى عمليات صهارية ، بالإضافة إلى العمليات الرسوبية والتحولية.

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

<http://minerals.er.usgs.gov/>
<http://www.dos.gov/>
<http://energy.usgs.gov/>
<http://www.smcnet.org/opaque-ore/>
<http://dir.yahoo.com/Science/Engineering/Mining/>

المصطلحات المهمة

asphalt	أسفلت (زفت)	natural gas	غاز طبيعي
bauxite	بوكسيت	oil field	حقول بترول
brine	أجاج (ماء ملح مر)	oil pool	تجمع زيتي
crude oil	زيت خام	oil sands	رمال الزيت
disseminated mineral deposits	الرواسب المعدنية المتشورة	oil shale	طفل الزيت
exploration geology	جيولوجيا الاستكشاف	oil trap	مصيدة بترول
fission	انشطار	ore	خام (ركاز)
gangue	غث	pegmatites	بجماتيت
geologic resources	موارد جيولوجية	petroleum	بترول
grade	رتبة (مستوى التركيز)	placer	ركيزة (مرقد)
heavy crude	خام ثقيل	porphyry copper deposit	راسب نحاس بورفيرى
hot spring	ينابيع حارة	rank	رتبة (فحم)
hydrothermal mineral deposit	راسب معدنى حرمايى	reserves	احتياطيات
hydrothermal solutions	محاليل حرمايية	reservoir rock	صخر خزان
laterite	لاتيريت	residual mineral deposit	راسب معدنى متبقى
magmatic mineral deposit	راسب معدنى صهارى	resources	موارد
metallogenic province	إقليم تمعدن	source rock	صخر مصدر
migration	هجرة	stratabound	مقيّد الطباقية
mineral deposit	راسب معدنى	volcanogenic massive sulfide deposit	رواسب الكبريتيد الكتلية بركانية النشأة

الأسئلة

- 1- اذكر المجموعات الرئيسية للموارد الجيولوجية. اذكر أمثلة لكل مجموعة.
- 2- ما الشروط الجيولوجية الضرورية لتراكم الزيت والغاز الطبيعي؟
- 3- قارن بين الاحتياطيات والموارد. هل يمكن أن تزداد الاحتياطيات؟ وهل يمكن أن تزداد الموارد؟
- 4- تتميز رواسب طفيل الزيت بأنها غنية في المواد العضوية. اشرح لماذا لا يستخدم طفيل الزيت كمصدر للبترول.
- 5- لقد أوضحت عمليات حفر آبار الزيت، أن البترول في كل وحدة حجم من الصخور من حقب الحياة الحديثة أكبر من ذلك الموجود في صخور حقب الحياة القديمة من النوع نفسه. اشرح.
- 6- ما الوقود الحفري؟ اذكر أربعة أنواع من الوقود الحفري.
- 7- هل يتكون الفحم بالاستقرار البلوري أو بالعمليات الحرماية أو بضغط المواد النباتية أو فوق قاع المحيط؟
- 8- تتواجد الرواسب المعدنية الفلزية في ثلاثة فقط من الأوضاع التكتونية الأربعة التالية : (أ) حيود وسط المحيط، (ب) أقواس الجزر ، (ج) نطاقات الإندساس، (د) بلومات الوشاح حددها .
- 9- ما الرواسب المعدنية؟ اذكر طريقتين يمكن أن يتكون بهما راسب معدني.
- 10- اذكر نوعين رئيسيين من الرواسب الحرماية .
- 11- اذكر الخام الرئيسي للألومنيوم وطريقة تكونه .
- 12- ما العوامل التي تحدد ما إذا كان الراسب المعدني خائفا أم لا؟
- 13- ما العوامل التي تسبب تركيز المعادن في رواسب المكث؟. اذكر أربعة معادن يمكن استخراجها من تلك الرواسب .

الملاحق

ملحق (أ) : البادئات واللاحقات والجذور الشائعة الاستخدام (2,1)

abyss	عميق	mega-	كبير، صخيم
alluvium	ترسب مياه سطح جارى	meso-	متوسط، أوسط
anti-	مضاد، معاكس	meta-	تغير، تحول
archea-(archaeo)-	قديم	micro-	صغير، دقيق، ومع اسم الصخر تدل على أنه متوسط التوضيع
astheno-	ضعيف، ينقصه الشدة	-morph	شكل
bi-	ثاني، مزدوج	old-	شبه، له نفس الشكل
ceno	حديث	ortho-	مستقيم، متعامد، وعندما تسبق اسم صخر متحول تعنى اشتقاقه من صخر نارى
circum-	دائرى، حول	paleo-	قديم، من أزمنة ماخفية
clast	مكسور	para-	عندما تسبق اسم صخر متحول تعنى أنه ناتج عن تحول صخر رسوبى
-cline	متحدر، مائل	ped-	قدم، أسفل
de-	أدنى، يخفص، يزيل	pelagic	متعلق بالمحيط
dis-	انفصال، متعارض مع	peri-	حول، قريبا من
endo-	داخل، بداخل	petro-	حجر أو صخر
epi-	على، فوق، نال	phanero-	واضح، مرئى
eu-	جيد، جيد التكوين	pheno-	ظاهر، كبير
ex-	خارج، بعيدا عن، بدون	pluto-	تكون تحت أحافى كبيرة (إله الرومان تحت سطح الأرض)
exo-	خارجى، خارج عن	pre-	قبل
feld	حقل	proto-	أولى، ابتدائي، بدائى
folium	ورقة	pyro-	نار
geo-	الأرض	spar	مادة متبلورة
glomer-	تجمع	-sphere	كرة
hetero-	مختلف، مذابر	stria	حز صغرى، شريط
holo-	بالكامل، تماما	sub-	تحت، أقل من، دون
homo-	مماثل تماما	super-	فوق، أكبر من، بالإضافة إلى
hyalo-	زجاجى	syn-	سويا، في نفس الوقت
hyper-	كثير جدا، فوق المعتاد	tect-	تعنى بناء في البركانية وتعنى في الجيولوجيا حركة أو تراكيب بسبب قوى داخلية
hypo-	تحت، دون، تقريبا	terra, terre	يتعلق بالأرض
hydro-	ماء	tri-	ثلاثة، ثلاثى
iso-	تساوى، مساو	ultra-	فوق، وراء
kata-	أسفل، تحت، أقصى عنق	vitr-	زجاجى
-lith, lith-	حجر أو صخر	xeno-	غريب
macro-	كبير، عظيم	zoo, zoic-	حيوان

(1) الادة prefix هى مقطع يوضع في بدء كلمة أخرى لتغيير معناها أو لتكوين كلمة جديدة، أما اللاحقة suffix فهى مقطع يضاف إلى آخر الكلمة لتغيير معناها أو لتكوين كلمة جديدة، أما الجذر root فهو أصل أو مصدر لكلمة.

(2) جمجمة من ، whitlen , D.G.A. and Brooks , J.R.V. , 1973. The Penguin Dictionary Geology. Penguin Books, Boston.

-Plummer, C.C, McGeary, D., and Carlson, D.H., 2001, Physical Geology, McGraw Hill, Boston .

- حسين، عبد العزيز عبد القادر، معجم المصطلحات الجيولوجية، 1999 م، مركز النشر العلمى - جامعة الملك عبد العزيز، جدة .

ملحق (ب) : العناصر الأكثر أهمية في الجيولوجيا مرتبة أبجديا

الرقم الذري	الرمز	العنصر	الرقم الذري	الرمز	العنصر
10	Ne	نيون	13	Al	ألومنيوم
28	Ni	نكل	51	Sb	أنثيمون
41	Nb	نيوبيوم	18	Ar	أرجون
7	N	نيتروجين	33	As	زرنيخ
8	O	أكسجين	65	Ba	باريوم
15	P	فوسفور	4	Be	بيريليوم
78	Pt	بلاتين	83	Bi	بزموت
94	Pu	بلوتونيوم	5	B	بورون
84	Po	بولونيوم	35	Br	بروم
19	K	بوتاسيوم	48	Cd	كاديوم
59	Pr	براسيديوم	20	Ca	كالسيوم
61	Pm	بروميثيوم	6	C	كربون
91	Pa	بروتكتينيوم	58	Ce	سيريوم
88	Ra	راديوم	55	Cs	سيزيوم
86	Rn	رادون	17	Cl	كلور
37	Rb	روبيديوم	24	Cr	كروم
62	Sm	سماريوم	27	Co	كوبالت
21	Sc	سكانديوم	29	Cu	نحاس
14	Si	سليكون	66	Dy	ديسبروسيوم
47	Ag	فضة	68	Er	إربيوم
11	Na	صوديوم	63	Eu	يوروبيوم
38	Sr	استرونشيوم	9	F	فلور
16	S	كبريت	64	Gd	جادولينيوم
73	Ta	نتالوم	31	Ga	جاليوم
52	Te	تلوريوم	32	Ge	جرمانيوم
65	Tb	تربيوم	79	Au	ذهب
90	Th	ثوريوم	2	He	هيليوم
69	Tm	تولميوم	67	Ho	هولميوم
50	Sn	قصدير	1	H	هيدروجين
22	Ti	تيتانيوم	26	Fe	حديد
74	W	تنجستن	57	La	لانثانوم
92	U	يورانيوم	82	Pb	رصاص
23	V	فناديوم	3	Li	ليثيوم
54	Xe	زينون	71	Lu	لوتيتيوم
70	Yb	إتربيوم	12	Mg	ماغنسيوم
39	Y	إتريوم	25	Mn	منجنيز
30	Zn	زنك	80	Hg	زئبق
40	Zr	زركونيوم	42	Mo	موليبدينوم
			60	Nd	نيوديميوم

ملحق (ج) : مقارنة بعض الوحدات المترية والإنجليزية

الوحدات Units

kilometer (km 1)	=	meters (m 1000)
meter (m 1)	=	centimeters (cm 100)
centimeter (cm 1)	=	inch (in 0.39)
mile (mi 1)	=	feet (ft 5280)
foot (ft 1)	=	inches (in 12)
inch (in 1)	=	centimeters (cm 2.54)
square mile (mi ² 1)	=	acres (a 640)
kilogram (kg 1)	=	grams (g 1000)
pound (lb 1)	=	ounces (oz 16)
fathom 1	=	feet (ft 6)

التحويلات Conversions

عندما نريد تحويل وحدات العمود الأول إلى ما يقابلها في العمود الثالث اضرب في الأرقام المقابلة في العمود الثاني

الطول Length

inches	بوصات	2.54	centimeters	مستيمترات
centimeters	مستيمترات	0.39	inches	بوصات
feet	قدم	0.30	meters	أمتار
meters	أمتار	3.28	feet	قدم
yards	ياردات	0.91	meters	أمتار
meters	أمتار	1.09	yards	ياردات
miles	أميال	1.61	kilometers	كيلومترات
kilometers	كيلومترات	0.62	miles	أميال

Masses and Weights الكتل والأوزان

ounces	أونوسات	28.35	grams	جرامات
grams	جرامات	0.035	ounces	أونوسات
pounds	أرطال إنكليزية	0.45	kilograms	كيلو جرامات
kilograms	كيلو جرامات	2.205	pounds	أرطال إنكليزية

ملحق (د) : تعرف المعادن

يتميز كل معدن بمجموعة من الصفات الفيزيائية والكيميائية يستخدم في تحديدها أجهزة وتقنيات متخصصة. ويمكن التمييز بين معظم المعادن الشائعة باستخدام بعض الاختبارات البسيطة. فخاصية الانقسام cleavage من الخواص المميزة والمفيدة التي يلزم فيها تحديد عدد أسطح الانقسام والزوايا المحصورة بين اتجاهات الانقسام ونوع كل اتجاه من هذه الاتجاهات. ومن الاختبارات البسيطة أيضاً الصلادة hardness (ويرمز لها اختصاراً بالرمز H) والبريق luster واللون color وهيئة البلورة crystal form - إذا كانت موجودة. كما يمكن إجراء اختبارات كيميائية بسيطة أيضاً باستخدام حامض الهيدروكلوريك المخفف للملاحظة هل يحدث فوران للمعدن أم لا.

ويمكن استخدام جداول التعريف هنا لتمييز معظم المعادن الشائعة المكونة للصخور، وبعض أهم معادن الحام (الركاز) الشائعة. ولتعرف المعادن الأقل شيوعاً، يمكن الرجوع إلى أحد المراجع المتخصصة. ويحتاج تعرف المعادن إلى بعض التمرين والخبرة.

ويحتتم تعرف المعادن المكونة للصخور الشائعة ضرورة وجود دليل بسيط يسهل تعرفها. ويتضمن هذا الدليل تحديد ما إذا كانت صلادة المعدن أكثر أو أقل من الزجاج، ثم متابعة تعرف الصفات الأخرى التي تؤدي إلى التعرف على المعدن. ويمكن التحقق من دقة تعرف المعدن بالرجوع إلى الصفات الأخرى للمعدن والموضحة في جدول (1، أ).

وتكون معادن الركاز مميزة عادة ولا تحتاج عموماً للدليل. ولتعرف معدن ركاز معين، يتم تتبع صفاته في جدول (2، أ)، وتحديد مجموعة الصفات التي تتطابق مع المعدن المجهول المراد التعرف عليه.

دليل لتعريف المعادن المكونة للصخور الشائعة

يتم تحديد ما إذا كان سطح المعدن المكشوف حديثاً أكثر أو أقل صلادة من الزجاج. فإذا كان المعدن لا يخدش باستخدام نصل سكين فإنه يكون أكثر صلادة من الزجاج، أما إذا كان من الممكن خدش المعدن باستخدام نصل سكين، فإن المعدن يكون أقل صلادة من الزجاج. وتوضح الخطوات التالية طريقة تعرف المعادن الشائعة.

I- المعدن أكثر صلادة من الزجاج

نفحص خاصية الانقسام في المعدن، فإذا كان الانقسام غير موجود، تابع ما يلي، أما إذا كان يوجد بالمعدن انقسام تابع في ب.

أ. المعدن لا يوجد به انقسام:

1- البريق زجاجي vitreous luster

- لون أخضر زيتوني أو بني - أوليفين olivine.

- بني محمر أو في بلورات متساوية الأبعاد بها اثنا عشر وجهاً أو أكثر - جارت garnet

- لون فاتح عادة أو شفاف - كوارتز quartz.

2 - بريق فلزي metallic luster

- أصفر زاه - بيريت pyrite

3 - شحمي أو شمعي

- أخضر أو أسود مرقط - سريتيت serpentine

ب - المعدن به انقسام : حدد عدد اتجاهات الانقسام في البلورة أو في حبة معدن واحدة .

1- اتجاهان جيدان good متقاطعان عند أو قريباً من 90° - فليبار feldspar.

- إذا كان يمكن رؤية الحزوز على أسطح الانقسام - بلاجيوكليز plagioclase

- إذا كان اللون قرنفلياً أحمر وردياً أو قرنفلياً ضارباً للصفرة - فليبار بوتاسي (أو أورثوكليز) potassic feldspar .

- إذا كان أبيض أو رمادياً فاتحاً دون حزوز، فإنه قد يكون أحد نوعي الفليبار.

2- اتجاهان واضحان fair متقاطعان عند 90°.

- أخضر غامق إلى أسود - بيروكسين (عادة أوجيت augite)

3- اتجاهان ممتازان excellent، ولكن التقاطع أكبر أو أقل من 90°.

- أخضر غامق إلى أسود - أمفيبول (عادة هورنبلند hornblende) .

II المعدن أقل صلادة من الزجاج

أ. لا يوجد انقسام بالمعدن

1- بريق أرضي earthy luster وفي كتل دقيقة جداً لا يمكن تمييز الحبيبات المفردة - مجموعة مادة

الصلصال (مثل معدن الكاولينيت kaolinite)

ب - يوجد انقسام بالمعدن

1- اتجاه واحد

- انقسام كامل يكون شرائح مرنة - ميكا

- أبيض أو شفاف - ميكا مسكوفيت muscovite.

- أسود أو بني داكن - ميكا بيوتيت biotite .

2- ثلاثة اتجاهات

- الاتجاهات الثلاثة كلها كاملة perfect وتتقاطع عند 90° (انقسام مكعب)

- هاليت halite

- الاتجاهات الثلاثة كلها كاملة ولكن لا تتقاطع عند 90° أو قريباً من ذلك.

- يحدث فوران للمعدن في الحامض المخفف - كالسيت calcite.

- يحدث فوران لمسحوق المعدن في الحامض المخفف - دولوميت dolomite

جدول (1): الخواص المميزة للمعادن الشائعة المكونة للصخور

الاسم (كتب أسماء المجموعات المعدنية باللون الأسود)	التركيب الكيميائي	البناء البلوري والمجموعة الكيميائية	الخواص المميزة	الخواص الأخرى
أمفيبول amphibole (مجموعة معدنية يكون فيها المورنيلند هو المعدن الأكثر شوعاً)	$XSi_2O_{22}(OH)_2$ X خليط من Ca, Na, (Fe, Mg, Al)	سيليكات - سلاسل مزودة	انقسام منشوري كامل، يتقاطع مستوي انقسام يزوايا تقرب من 60° و 120° .	الصلادة = 5-6 لـ لون المورنيلند أخضر غامق إلى أسود؛ يميل إلى تكوين بلورات إبرية أو مستطيلة؛ له بريق زجاجي.
أوجيت augite (انظر البروكسين)				
بيوتيت biotite (انظر الميكا)				
كالسيت calcite	$CaCO_3$	كربونات	انقسام معيني الأوجه (ثلاثة) مستويات انقسام متميزة توازي الأوجه) الصلادة = 3. يتفاعل بشدة مع الحمض المخفف.	أبيض أو رمادي أو عديم اللون؛ بريق زجاجي، بلورات شفافة لها انكسار مزدوج.
معادن الصلصال clay minerals (الكاوليت أحد المعادن الشائعة في هذه المجموعة المعدنية الكبيرة)	يشمل التركيب $XSi_4O_{10}(OH)_8$ X عبارة عن Mg, Al, (Ca, Na, Fe, K)	سيليكات صفائحية	بلورات ميكروسكوبية عموماً، كتل معادن الصلصال أكثر رخاوة من ظفر الإصبع . بريق أرضي . له رائحة الطين عندما يبلل بالماء .	يبدو أنه ينتج عن التجوية الكيميائية للفلسبارات وغيرها من معادن السيليكات، وهو مكون لمعظم أنواع التربة.
الدولوميت dolomite	$CaMg(CO_3)_2$	كربونات	مماثل للكالسيت (انقسام معيني الأوجه، الصلادة = 3) يتفاعل مسحوق المعدن مع الحمض الخفيف .	عادة أبيض أو رمادي أو عديم اللون، بريق زجاجي.
فلسبار feldspar (مجموعة شائعة من المعادن) وتشمل هذه المجموعة:	سيليكات إطارية	سيليكات إطارية	الصلادة = 6 (يغدش الزجاج) . مستوي انقسام يفصلها زاوية قدرها 90° .	بريق زجاجي، لكن السطح قد يتجوى إلى طفل مما يعطيه بريقاً أرضياً . البلورة الكاملة تأخذ شكل صندوق طولي .
فلسبار بوتاسي (أورثوكليس)	$KAlSi_3O_8$		أبيض أو وردي أو لون السلمون .	لا يجتوى على أي تخطيط على أسطح الانقسام .

(يتبع) :

الاسم (كتب أسماء المجموعات المعدنية باللون الأسود)	التركيب الكيميائي	البناء البلوري والجموعة الكيميائية	الخواص المميزة	الخواص الأخرى
بلاجيوكلاز plagioclase	سلسلة من المعادن تتراوح في التركيب بين الأنورثيت $CaAl_2Si_2O_8$ والأليت $NaAlSi_3O_8$		أبيض أو رمادي فاتح إلى غامق ، ونادرا ما تكون هناك ألوان أخرى ، قد يمتزج على حزوز striation على أسطح الانقسام .	تكون الأنواع الغنية بالكالسيوم ذات لون رمادي أغمق ، كما قد يظهر تلاعب بالألوان play of colours .
جارت garnet	$XSiO_4$ (X عبارة عن خليط من Ca, Mg, Fe, Al, Mn)	سيليكات مفردة	لا يوجد انقسام ، بني محمر عادة . يميل إلى أن يأخذ شكل بلورات كاملة متساوية الأبعاد ، عادة 12 وجهها . الصلادة = 7.	نادرا أصفر أو أخضر أو أسود . يوجد عادة في الصخور المتحولة ، يريق زجاجي .
جبس gypsum	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	كبريتات	الصلادة = 2 . اتجاه انقسام واحد واضح واتجاهين آخرين كاملين . يريق زجاجي أو حريزي .	ألوانه تتراوح بين الواضح والأبيض والباستيل . وتكون الحبيبات المنفصمة مرنة
هاليت halite	NaCl	هاليدات	انقسام مكعب (3 مستويات تتقاطع عند زوايا قدرها 90°) ، الصلادة = 2.5 . له مذاق ملحي . يذوب في الماء .	عادة شفاف إلى أبيض .
هيماتيت (انظر جدول معادن الخامات)				
هورنبلند hornblende				
كاولينيت (انظر kaolinite) (انظر الصلصال)				
ميكام mica (تشمل هذه المجموعة) :	$K(X)(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	سيليكات صفائحية	مستوى انقسام واحد (يتكرر يسهولة إلى صفائح مرنة) . زجاجي	الصلادة = 2-3 . يريق
بيوتيت biotite	(X عبارة عن Mg, Fe, Al)		أسود أو بني غامق .	

(يتبع) :

الخصائص الأخرى	الخصائص المميزة	البناء البلوري والمجموعة الكيميائية	التركيب الكيميائي	الاسم (كتبت أسماء المجموعات المعدنية باللون الأسود)
	أبيض أو شفاف		(X عبارة عن Al)	مسكوفيت muscovite
يوجد كحبيبات صغيرة في الصخور النارية المافية والفوقالمافية .	لا يوجد انفصام . لونه أخضر زيتوني أو بني . الصلادة = 6-7 . البريق زجاجي .	سيليكات مفردة	X_2SiO_4 (X عبارة عن Fe, Mg)	أوليفين olivine
				أورثوكلاز orthoclase (انظر الفلسبار)
				بلاجيوكلاز plagioclase (انظر الفلسبار)
يوجد عادة كبلورات كاملة مكعبة الشكل أو لها خمسة أوجه . يتجوى إلى لون بني .	الصلادة=6 (يخدش الزجاج) . بريق لامع أو أصفر أو معدني . يخدش أسود .	كبريتيد	FeS_2	بيريت pyrite (الذهب الكاذب)
الصلادة = 6 ، الأوجيت لونه أخضر غامق إلى أسود . البريق زجاجي . بلورات قصيرة وغلظية .	مستويا انفصام يتقاطعان بزوايا تقرب من 90° .	سيليكات -سلاسل مفردة	$XSiO_3$ (X عبارة عن Fe, Mg, Al, Ca)	بيروكسين pyroxene (مجموعة معدنية الأوجيت أهم معادنها)
أي لون ، ولكن عادة يكون عديم اللون أو أبيض أو شفافاً . بلورات جيدة لها ستة أوجه منشورية على هيئة أعمدة لها هرم معقد على قمتها .	الصلادة=7 . لا يوجد انفصام . بريق زجاجي . لا يتجوى إلى صلصال .	سيليكات إطارية	SiO_2	كوارتز quartz
أحياناً ليفي (الأسبستوس asbestos)	تختلف الصلادة ، ولكنه يكون أقل صلادة من الزجاج . لونه أخضر مبرقش أو أسود . بريق شحبي . يتكسر على امتداد أسطح لمساء منحنية .	سيليكات صفائحية	$Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$	سربنتين serpentine

جدول (2): الخواص المميزة لمعادن الخامات الشائعة

الاسم	التركيب الكيميائي	الخواص المميزة	الخواص الأخرى
أزوريت	$Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$	اللون أزرق سبأوى؛ يخرج فقائيع في الحامض المخفف .	الصلادة=3-4
بوكسيت	$Al_2O_3.nH_2O$	له بريق أرضى . نوع من الصلصال . كرات في حجم حبيبات البسلة في أرضية دقيقة الحبيبات.	
بوريت	$CuFeS_4$	بريق فلزي . لون معتم إلى أرجواني قرصي .	مخدش رمادي ؛ الصلادة=3 (أقل صلادة من الزجاج)
الكالكوپريت	$CuFeS_2$	بريق فلزي . أصفر نحاسي . أقل صلادة من الزجاج.	مخدش أسود.
سنيار	HgS	اللون أحمر فاتح إلى حر قرمزي .	أقل صلادة من الزجاج . بريق أرضى عادة.
جالينا	PbS	بريق معدني، رمادي؛ ثلاث مستويات انقسام بفلصها زاوية 90° (مكعب) . كثافة نوعية كبيرة.	أقل صلادة من الزجاج . مخدش رمادي.
ذهب	Au	بريق معدني، أصفر؛ الصلادة=3 (أقل صلادة من الزجاج، يتكسر إلى رقائق رقيقة، ويسهل تشويهه)	مخدش أصفر؛ كثافة نوعية عالية .
هاليت	$NaCl$	مذاق ملحي؛ 3 مستويات انقسام تتقاطع عند 90° (انقسام مكعب) .	شفاف أو أبيض؛ يذوب بسهولة في الماء .
هيماتيت	Fe_2O_3	مخدش أحمر- بني .	كتل حراء أو بلورات أو رقائق لونها معدني أو فضي.
ليمونيت	$Fe_2O_3.nH_2O$	بريق أرضى؛ مخدش أصفر- بني .	لونه أصفر إلى بني؛ أقل صلادة من الزجاج.
ماجنتيت	Fe_3O_4	بريق معدني، أسود؛ مغناطيسي.	أصلد من الزجاج . مخدش أسود.
مالاكييت	$Cu_2(CO_3)(OH)_2$	لونه ولون مخدشه فاتح-أخضر	أقل صلادة من الزجاج؛ يخرج فقائيع مع الحامض المخفف .
سفاليراييت	ZnS	لونه بني إلى أصفر؛ ست مستويات انقسام .	بريق صمغي؛ مخدش أصفر أو كريمي؛ أقل صلادة من الزجاج.
تلك	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	أبيض أو رمادي أو أخضر؛ الصلادة=1 (أقل صلادة من ظفر الإصبع) .	لمس شمعي .

قائمة ببعض المراجع المختارة

أولاً. المراجع العربية

- حلمى ، محمد عز الدين ، 2002 : علم المعادن ، الطبعة السابعة ، مكتبة الأنجلو المصرية ، القاهرة ، 486 صفحة .
- سعيد ، رشدى ، 1993 : نهر النيل : نشأته واستخدام مياهه فى الماضى والمستقبل . دار الهلال ، القاهرة ، 342 صفحة .
- معجم الجيولوجيا ، الطبعة الثانية ، مجمع اللغة العربية ، القاهرة ، 643 صفحة .
- تاريوك ، إدوارد جى ، ولوتجنز ، فريدريك ، ك. ، 1989 : الأرض : مقدمة للجيولوجيا الطبيعية ، ترجمة حمودة ، عمر سليمان واليعقوبى ، البهلولى على و سالم ، مصطفى جمعة ، منشورات مجمع الفاتح للجامعات ، ليبيا ، 643 صفحة .
- حسن ، محمد يوسف ، شريف ، عمر حسين ، والنقاش ، عدنان باقر ، 1983 : أساسيات علم الجيولوجيا . جون وايل وأولاده ، نيويورك ، 550 صفحة .
- حسين ، عبد العزيز عبد القادر ، 1999 : معجم المصطلحات الجيولوجية . مركز النشر العلمى ، جامعة الملك عبد العزيز ، جدة ، المملكة العربية السعودية ، 387 صفحة .
- فرج ، إبراهيم عبد القادر ، 2000 : قاموس مصطلحات علوم الأرض (انجليزى - عربى) . جامعة الملك عبد العزيز ، جدة ، المملكة العربية السعودية ، 1841 صفحة (جزءان) .
- فوستر ، روبرت ج. ، 1980 : الجيولوجيا العامة ، ترجمة: عبد القادر عابد ، شاكر المقبل وسعد الباشا ، منشورات مجمع اللغة العربية الأردنى ، 792 صفحة .
- مشرف ، محمد عبد الغنى وإدريس ، الطاهر عثمان ، 1990 : قاموس مصطلحات الرسوبيات المصور . عمادة شئون المكتبات - جامعة الملك سعود - الرياض ، المملكة العربية السعودية ، 243 صفحة .

ثانياً. المراجع الأجنبية

- Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston, 397p.
- Compton, R. R., 1962: Manual of Field Geology. John Wiley and Sons, Inc., New York, 378 p.
- Decker, R. and Decker, B., 1997: Volcanoes. 4th edition. W. H. Freeman and Company, New York 321p.
- Embabi, N. S., 2004: The Geomorphology of Egypt: Landforms and Evolution, vol. 1. The Egyptian Geographic Soc., Cairo, 447p.
- Ernst, W.G. (Editor), 2000: Earth Systems: Processes and Issues. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 566p.
- Fritz, W. J. and Moore, J. N., 1988: Basics of Physical Stratigraphy and Sedimentology. John Wiley and Sons, Inc., New York, 371p.

Gass, I. G., Smith, P. J. and Wilson, R.C.L. (Editors), 1977: Understanding the Earth, 2nd edition. The Open University Press, Sussex, 383p.

Hamblin, W.K., 1985: The Earth's Dynamics Systems, 4th edition. Burgess Publishing, Minneapolis, 528p.

Holmes, D.L., 1984: Holmes Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson, Great Britain, 730p.

Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York, 504p.

Lowrie, W. L., 2000: Fundamentals of Geophysics. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 354p.

Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis, 626p.

Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston, 578p.

Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York. 682p.

Said, R. (Editor), 1990: The Geology of Egypt. Balkama, Rotterdam, 734p.

Said, R. (Editor), 1993: The River Nile: Geology, Hydrology and utilization. Bergman Press, Oxford, 320p.

Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York, 575p

Strahler, A. and Strahler, A., 1999: Introducing Physical Geography, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York, 616p.

Tarback, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York, 605p.

الدليل

يشمل هذا الدليل أهم الكلمات التي وردت في الكتاب وأهم الصفحات التي وردت بها.

بازلت وسائدى 179 ، 183	(أ)
باهوى هوى 179	أجلومرات 185 ، 186
بجادا 557	إجهاد القص 401
بجياتيت 163	إعادة الملء 477
بحر الرمال 549	اقتلاع 514
بحيرة بلابا 559	الجيولوجيا (علم الأرض) 39
بحيرة قوسية (بحيرة قرن الثور) 437	الجيولوجيا التاريخية 39
بركان 178	الجيولوجيا الفيزيائية 39
بركان درعى 190	اندساس 63
بركان طباقى 191 ، 192	انزلاق أرضى 402
بركان مركب 178 ، 191	انزلاق الحطام 403 ، 407
بريشيا بركانية 185 ، 186	انزلاق صخرى 403
بريشيا رسوبية 255	انزلاق قاعدى 510
بلابا (بحيرة جافة) 559	انسياب ارتوازى 476
بلوتون 118 ، 125	انسياب الحطام 407
بلوم 126 ، 199	انسياب الطين المائع 406
بلومات 165	انسياب ترايى 409
بيتة الترسيب 275	انسياب حبيبي 406 ، 409
بيدمنت (سفع جبل) 557 ، 558	انسياب طينى 408
(ت)	انسيابات الراسب 406
تأثير كوريولى 539	انصهار جزئى 147
تبركن 119 ، 177	انفصال جليدى 509 ، 510
تبلور 117 ، 118 ، 126	انهيال كتلى 410
تبلور تجزئى 152	آه آه 179 ، 181
تتلج 510	بانوليث 118 ، 161
تجبل (نشأة الجبال) 127	(ب)
تجوية 127	بازلت 120
تحرك كتلى 397 ، 406 ، 409	بازلت فيضى 181

(ث)	تحول إقليمي 123
ثلج 502	تحول تماسي 123
ثلج جليدي 508	تخلل 471
(ج)	تدرج هيدروليكي 471
جابر و 120	تدهور 405
جبس 269	تذرية 542 ، 543
جبل جليد 505	تراكم 509
جبل منعزل (جزيري) 559	تراكيب رموية 271
جدة موازية (ج. جدد موازية) 118 ، 146 ، 161	تربة الصقيع الدائم 515 ، 522
جرانوديوريت 120	تشرت 266 ، 270
جرانيت 120	تشققات الطين 274 ، 275
جروننة 161	تصحر 121 ، 560
جسر طبيعي 444	تصخر 252 ، 253
جلاليد منقولة 514	تصريف 429 ، 430 ، 448 ، 449 ، 477 ، 479
جلمود (ج. جلاميد) 255 ، 256	تطبيق 122 ، 249 ، 263 ، 271 ، 272 ، 273 ، 287
جليد 501 ، 502	تطبق متدرج 272 ، 273
جنادل 432 ، 439	تطبق متقاطع 275
جيد الفرز 260	تعرية 120 ، 121
(ح)	تغيرات مابعد الترسيب 252
حابس الماء (طبقة كتيمة) 472	تفرا 184
حجر الدولوميت 268	تقليب (اضطراب) حيوي 273 ، 274
حجر جيرى 287	تل جليدي 499
حجر رملي 255 ، 256	تل مستدق القمة 559
حجرة صهارة 148	تل نضيدي 559
حريث 514	تلاحم 252
حز جليدي (ج. حزوز) 511	تمايز 45
حصى 255	تمثل 155 ، 160 ، 165 ، 166
حصى كبير 255	تورق 123
حطام صخري (أديم) 66	تيار العكر 273 ، 278
حفرة بالوعية 486	تيارات العكر 410
حولة القاع 435	

- حولة ذاتية 440
 حولة معلقة 440
 حوض رسوبي 251
 حوض صرف 426|451
 حيد الثلجة 511
 حيد لازلزالي 199
 حيد وسط محيط 54
 (خ)
 خث (بيت) 251
 خط الثلج 508
 خنادق 55
 (د)
 داخنة 195
 دارة الجليد 504، 505
 دفق التربة 406
 دقيق صخري 514
 دلنا 447، 449، 461، 463
 دلنا قدم الطائر 449، 461، 463
 دورة الصخور 125، 126
 دورة الماء 423، 424
 دياتريم (ناقة بركانية) 193
 (ر)
 راسب 251، 252، 262
 راسب أو صخر رسوبي تبخري 268، 288
 راسب أو صخر رسوبي عضوي 270
 راسب أو صخر فتاتي 255
 راسب أو صخر كربوناتي 263
 راسب أو صخر كيميائي 263
 راسب أو صخر كيميائي أو حيوي 263
 رافد 441
 رصيف جري 267
 رصيف صحراوي 543
 رف جليدي 506
 رف قاري 51
 ركام 413، 557
 ركام جليدي (مورين) 514، 515
 ركيزة (مرقد أو رواسب حصوية مكانية) 441
 رماد 185، 186
 رماد بركاني 141
 رمل 255، 256
 رواسب اكتساح 515
 رواسب العكر 411
 رواسب فتاتية 121
 رواسب كيميائية حيوية 121
 ريحي 532، 555
 زاوية الاستقرار 396، 397، 400، 410، 413
 (ز)
 زجاج 139
 زحف 410، 440
 زيت 263، 271
 (س)
 سحنة 279
 سحنة رسوبية 279
 مسح 542
 سدم (ج. سديم) 42
 سفح الرمال 543
 سقوط الحطام 403
 سقوط صخري 397
 سلسلة التفاعل المتصلة 149، 150، 151، 153
 سلسلة التفاعل غير المتصلة 150
 سهل محقي 52
 سهل فيضي 444

- (ش)
شرفة (ج. شرفات) أو مصطبة نهرية 444
شعاب 264 ، 278
- (ص)
صاعد (ج. صواعد) 485
صحراء 552
صحراء ظل المطر 539 ، 552 ، 553 ، 540
صخر 40
صخر الأساس 125
صخر الإقليم (صخر المنطقة) 118
صخر الحرث 514
صخور المنطقة أو الإقليم 140
صخور بركانية 120 ، 140 ، 165
صخور بلوتونية (سحيفة) 118 ، 125
صخور دخيلة 155 ، 160 ، 167
صخور رسوبية 126 ، 128
صخور فتاتية نارية 139 ، 141
صخور متحولة 123 ، 124 ، 126
صخور نارية 117 ، 118 ، 119 ، 126 ، 127
صخور نارية متداخلة 118 ، 125
صخور نارية منشقة 119 ، 136 ، 140
صرف شجري 451
صرف شعاعي 451
صرف متعامد 451
صلصال رقائقى حولي 515
صُهارة 117 ، 139 ، 147 ، 148 ، 150 ، 151 ،
152 ، 153 ، 154 ، 155 ، 157 ، 161 ، 164 ،
166
صوان 270
- (ط)
طبقة (ج. طبقات) 271
- طبقة القاع 448
طبقة القمة 448
طبقة الواجهة 448
طف 188
طف بركاني 185
طف ملحوم 187
طمي 440
طين 253 ، 255 ، 262
- (ظ)
ظل الريح 546 ، 561
- (ع)
عروق ، 162 ، 163
عروق حرمائية 163 ، 164
علامات نيم 273
علم المعادن 74
- (غ)
غطاء جليدي (فريشة جليدية) 505 ، 517
غطاء صخري (أديم) 125
غلاف صخري 48
غلاف لدن (أستينوسفير) 48
- (ف)
فتات ناري 119 ، 179
فترة تكرار 431
فرز 254
فرضية سديمية 42
فؤارة (جيزر) 196 ، 488 ، 489
فورامينيفرا 264
فوسفوريت 270
فوهة (بركان) 178
فيض الفتات الناري 179

(ل)

لاية 117، 119، 138، 141، 177، 178، 179،

181، 183، 190

لاكوليث 162

لاهار (انبار طين بركاني) 179، 408

لب 46

لوح 626، 632

لوبيات 186

لويس 551

(م)

ماء جوفي 468، 473

ماء جوفي جائم 473

ماء جوي 469

مبدأ الوتيرة الواحدة 56

متبخرات 268

متداخلات متطابقة 161

متكون حديد 270

مثلجة (ج. مثالج) 501، 505

مثلجة الوادي 505

مثلجة بيدمنت 505

مثلجة قارية 505

مثلجة قطبية 508

مثلجة معتدلة الحرارة 507

مجري انحداري 451، 453

مجري تالي (لاحق) 453

مجري مائي مؤثر (نهر مغذ) 477

مجري مائي متأثر 447

مجري مائي متراكب 451

مجري مائي ملتزم 451

مخروط الانخفاض 478، 481

مخروط حمم فتاتية 191

فيضانات 428، 429، 431، 435، 438، 444،

445، 466

فيضانات مفاجئة 554

فيورد (ج. فيوردات) 499، 504، 505

(ق)

قاطع (ج. قواطع) 118، 119

قانون دارسي 472

قدرة 435

قليفة بركانية 185

قرصنة نهريّة 451

قرن جليدي 511

قشرة 46

قشرة قارية 46

قشرة محيطية 46

قطع نهري 437

قلنسوة جليدية (ج. قلانس) 505

قوة القص 401

(ك)

كبس (دمج) 252، 253

كتلة شاخصة أو استوك 161

كثيب انطلاق 548

كثيب برخان (ج. برخانات) 547

كثيب رملي 545

كثيب طولي 548

كثيب قطع مكافئ (بارابولي) 548، 550

كثيب مستعرض 548

كثيب نجمي 548

كفاءة 435

كونجولومرات 255، 260

- مروحة طمسية (فيضية) 427 ، 557
مساقط المياه (شلالات)
مسامية 253 ، 472 ، 475
مستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية)
مصهور جزئي 147
معدن 74
مقسم المياه 451
مقياس الزمن الجيولوجي 40
مكمن ارتوازي 490
مكمن ماء جوفي 472 ، 473
مكمن ماء غير محصور 473
مكمن ماء محصور 472
منجرفات مثلجية 514
منسوب الماء الجوفي 469 ، 476
منسوب ماء جائم 473
منطقة إعادة الملء 477
منعطف 431 ، 437
منكشفات 125
مواد غير متناسكة (مفككة) 396
مواد متناسكة 396
مياه جوفية 468 ، 472 ، 473
ميسا (ربوة) 559
(ن)
نسيج 128 ، 138 ، 139
نسيج بورفيري
نصلة بركانية 193
نطاق التشيع 469 ، 477 ، 484
نطاق التهوية 469 ، 474 ، 481 ، 483
نطاق غير مشبع 485
نظرية الداوية الكبرى (الانفجار العظيم) 40
نظرية التبريد الواحدة 56
نظرية تكتونية الألواح 626
نفاد 509
نفاذية 472 ، 475
نقطة الانصهار الضغطي 507 ، 508 ، 522
نقطة ساخنة 165 ، 177
نهر 425 ، 429 ، 430 ، 434 ، 436 ، 438 ، 439
441 ، 446 ، 447 ، 449 ، 453
نيم الرمال (موجبات الرمال) 541
(ه)
هابط (ج. هوابط) 485
هبوط 251
مضاب بازلتية 181 ، 194
مضبة 559
هيار الحطام 406 ، 410
(و)
وادي خسف 55
وادي مشابه لحرف U 512
وادي معلق 513
وثب 440
وجه انزلاق 546
وجهرية 544
ورنيش الصحراء 554
وشاح 46
(ي)
ينبوع 476 ، 480

Weathering

تجوية

مجموعة العوامل التي تؤدي إلى تفتت الصخور وتحللها ، بسبب مزيج من التآكل الفيزيائي والتحلل الكيميائي .

Weathered rind

لحاء تجوية

نطاق تآكل لونه في الصخر المجوى يحيط بلب غير مجوى .

Welded tuff

طف ملتحم

صخور فتات ناري ، كان فتاتها الزجاجي لدنا وساخن جدا ، وعندما ترسبت انصهرت تحت تأثير الحرارة الكامنة في الفتات وثقل المواد المتساقطة لتكون صخر زجاجي ، ويسمى أيضا اجنمبريت ignimbrite .

Well

بئر

تجويف في الأرض ، مجهز لاستخراج سائل من باطن الأرض ، وخصوصا الماء والبترو .

X

Xenoliths

صخور دخيلة

فتات من صخر المنطقة country rock تكون محاطة بالكامل بالصخر الناري .

Y

Yardang

ياردانج (حيد ريحي)

مجموعة من التلال أو الحيدو المستطيلة والمتوازية لها قمم حادة ، تمتد في اتجاه الرياح السائدة في المناطق القاحلة ، ويبدو أن

الباردنجات قد حفررت بسبب تعرية الرياح التي تكون محملة بالرماد والغرين .

Z

Zeolite

زيوليت

طائفة من معادن السيليكات ، تحتوي على الماء في تجاويف في البناء البلوري ، تتكون نتيجة تحول أنواع أخرى من السيليكات (غالبا زجاج بركاني) عند درجة حرارة وضغط منخفض .

Zone of accumulation

نطاق التراكم

جزء الثلجة الذي يتميز بترآكم الثلج وتكون الجليد، ويسمى الحد الخارجي لهذا النطاق بخط الثلجة snow line .

Zone of aeration

نطاق التهوية

انظر "النطاق غير المشبع" unsaturated zone .

Zone of saturation

نطاق التشبع

النطاق الذي تمتلئ فيه تماما كل المسام المفتوحة في الراسب أو الصخر بالماء الأرضي (الجوف) .

Zoned crystal

بلورة متمنقة

بلورة مفردة من معدن واحد ، يختلف تركيبها الكيميائي في جزئها الداخلي عنه في جزئها الخارجي ، تكونت في معادن يمكن أن يكون فيها اختلاف في نسبة بعض العناصر ، وتنتج عن تغير تركيز العناصر في الصهارة أثناء تبردها .

U-shaped valley	وادي يشبه حرف يو	Volcanic breccia	بريشيا بركانية
	وادي عميق له جوانب حادة تنتهي بأرض مستوية ، وهو الشكل الذي ينتج عن تجوية المثالي .		صخر فئات ناري يكون فيه قطر الفتحات أكبر من 64 مم تكون نتيجة نشاط بركاني انفجاري .
V		Volcanic dome	قبة بركانية
Valley (stream)	وادي		تجمع مستدير حول خرج vent ، يتكون من لابة متجمدة شديدة اللزوجة لتساقط بعيدا بسرعة ، وتكون عادة لابة ريوليتية .
	المنطقة المحصورة بين قمم المنحدرات على كلا جانبي مجرى النهر .	Volcanic island arc	قوس جزر بركاني
Valley glacier	مثلجة الوادي		انظر قوس بركاني volcanic arc .
	مثلجة أصغر حجما من المثلجة القارية ، أو غطاء جليدي ينساب على امتداد أودية كبيرة في المناطق الجبلية .	Volcanic neck	نصلة بركانية
Varve	صلصال رقائقي حولي		قناة أسطوانية تقريبا من صخر ناري بركاني ، تكون أنبوبية التغذية لمخرج بركاني vent انفصلت عن الصخر المحيط نتيجة للتجوية .
	زوج من الطبقات الرقيقة ، يثق حجم الحبيبات فيها من أسفل لأعلى ، كما يتغير لونها من غامق اللون إلى فاتحه ، وتوجد في البحيرات الجليدية ، وتمثل ترسيب لفترة زمنية قدرها عام واحد .	Volcanic tuff	طف بركاني
Vein	عرق		صخر متصلد يتكون من فئات ناري صخري ورماد بركاني ناعم ، لحمت ببعضها بحرارتها الخاصة .
	ترسيب معدني في شق صخري .	Volcanism	تبركن
Ventifacts	وجهر بحيات		العمليات التي تؤدي لتكوين براكين ، حيث يؤدي اندفاع الصهارة والغازات المصاحبة في الغلاف الجوي أو فوق سطح الأرض إلى تكوين لابة تتصلد لتكون صخورا بركانية وتضاريس مميزة .
	حصي وزلط يحفظ بتأثيرات برى الرمال على سطحه ، والتي تصبح مستوية وناعمة ولها حواف حادة بينها .	Volcano	بركان
Vesicle	فجوة (ج. فجوات)		تل أو جبل مخروطي الشكل عادة ، تكون حول عنق vent مركزي اندفعت منه اللابة والمواد الفتاتية البركانية (النفرا) والغازات إلى سطح الأرض .
	فتحة صغيرة في صخر ناري بركاني ، تكون نتيجة طروب غاز كان ذائبا أصلا في الصهارة تحت ضغط مرتفع ، عندما كانت الصهارة الأم تحت سطح الأرض .	W	
Viscosity	لزوجة	Water divide	مقسم المياه
	مقياس مقاومة السائل للانسياب .		انظر مقسم المياه divide .
Volcanic arc	قوس بركاني	Water table	منسوب الماء الجوفي
	سلسلة مقوسة من الجبال تمتد على حافة قارية تكونت حزيا من النشاط الناري المصاحب لاندساس غلاف صخري يحيط تحت قارة ، مثل جبال الأنديز والكاسكيد .		السطح العلوي للنطاق المشبع بالماء الجوفي .
Volcanic ash	رماد بركاني	Waterfall	مسقط مياه (شلال)
	راسب بركاني يتكون من فئات صخري ، يكون عادة من الزجاج ، يقل قطره عن 2 مم ، ويتكون عندما تدفع قوة الغازات الهاربة رذاذا ناعما من الصهارة ، انظر رماد ash .		منطقة في مجرى النهر يكون التيار فيها أسرع من غيرها نتيجة زيادة مفاجئة في انحدار المجرى ، حيث تساوى سرعة تحرك المياه حيثتد سرعة السقوط الحر .

Time stratigraphic unit	وحدة طبقية زمنية	Tuff	طف
كل الصخور والرواسب التي تكونت خلال فترة محددة من تاوخي الأرض .		فتات ناري صخري يتكون من رماد بركاني أو تفسرا في حجم اللوبيات lapilli .	
Topography	طوبوغرافية	Turbidite	عكاريات (رواسب العكر)
تضاريس وشكل الأرض .		طبقة متدرجة الحبيبات من راسب ترسبت بتيارات تعكيرية .	
Topset layer	طبقة القمة	Turbidity current	تيار العكر
طبقة راسب غيرى تغطي الطبقات أمامية الموضع في الدلتا.		تيار تحركه الجاذبية الأرضية ، يتكون من خليط مخفف من راسب وماء كثافته أكبر من كثافة الماء المحيط به .	
Trace element	عنصر شحيح	Turbulent flow	انسياب مضطرب
عنصر يظهر في معدن بتركيز أقل من 0.1% (وغالبا أقل من واحد في الألف) .		نظام انسياب تتحرك فيه حبيبات المائع في دوامات وأعاصير .	
Trace fossil	حفريات الأثر		
شاهد غير مباشر على الحياة القديمة ، مثل موضع القدم وحفر الديدان وجر الذيل وغيرها ، وقد حفظت على أسطح الطبقات بصورة طبيعية .			
Transform boundary	حد ناقل	Ultramafic rock	صخر فوقماي
نقطة التقاء ظاهرتين تشوهيتين رئيسيتين ، مثل حيد وسط المحيط أو خندق قاع محيطي أو صدع مضربي الزلّة .		صخر ناري يتكون أساسا من معادن مالية ، ويمتد على أقل من 10% فلسبار . وتشمل الصخور فوقمايكية البريدوتيت والدويت والبيروكسينيت .	
Transform fault	صدع ناقل	Unconfined aquifer	مكمن ماء غير محصور
نوع من الصدوع المضربية الزلّة يربط بين ظاهرتين تركيبيتين رئيسيتين .		خزان لا يتغطى بطبقة حامية ، مما يؤدي إلى أن يكون مستوى الماء في البئر الذي يمتد في الخزان في مستوى الماء الجوفي في المنطقة المحيطة .	
Transverse dune	كثيب مستعرض	Unconformity	عدم التوافق
كثيب رمل مكون من حيد طويل وضيق يشبه الموجة، محوره عمودي على اتجاه الرياح السائدة أو اتجاه التيار .		سطح يفصل بين طبقتين ، ويمثل فترة توقف في عملية الترسيب ثم التجوية التي تؤدي إلى إزالة بعض الرواسب والصخور ، ثم يعود الترسيب مرة ثانية .	
Trap	مصيدة بترولية	Uniformitarianism, principle of	قاعدة الوتيرة الواحدة
صخر خزان له صخر سقف يساعد على تجمع البترول.		المبدأ الذي ينص على أن العمليات التي شكلت الأرض خلال الزمن الجيولوجي هي العوامل نفسها التي تعمل الآن.	
Trench	خندق	Uniform stress	إجهاد منتظم
أحواض مقوسة طويلة ، ضيقة وعميقة جدا في قاع البحر .		إجهاد متساوي في كل الاتجاهات .	
Tributary	رافد	Unsaturated zone	نطاق غير مشبع
رافد يربط وادئا أكبر .		منطقة تقع بين سطح الأرض ومنسوب الماء الجوفي	
Triple junction	ملتقى ثلاثي	groundwater table	تكون مسام الصخور بها غير ممتلئة بالماء ، ويسمى أيضا بنطاق التهوية zone of aeration .
التقاء بين ثلاثة مراكز انتشار حديثة ، حيث تكون الزاوية بين ذراعين تساوي 120° .			
Tsunami	تسونامي		
انظر موجة بحرية زلزالية seismic sea wave .			

Subsidence	هبوط	Tectonics	جيولوجيا بنيانية (بنائيات)
حركة تجبل رأسية ، حيث تغوص منطقة واسعة من القشرة الأرضية دون تشوه ملحوظ .		دراسة حركة وتشوه الغلاف الصخري ، كما تهتم بدراسة المعالم التركيبية الكبرى للجزء الخارجى من الأرض وأسباب تكونها .	
Subsequent stream	يجرى لاحق	Temperate (warm) glacier	مثلجة معتدلة الحرارة
رافد نحت مجراه فى الصخور الرخوة أو فى غيرها من التراكيب الجيولوجية ، نظرا لأنه أصبح منضبطا أو منظما .		مثلجة يكون فيها الجليد عند نقطة الانصهار الضغطى pressure melting point ، ويتواجد فيها الماء والجليد معا فى حالة اتزان .	
Superposed stream	يجرى مائى متراكب	Tensional stress	إجهاد شد
يجرى مائى نحت مجراه عبر مجموعة من الصخور حتى وصل إلى مجموعة أخرى تحتها تختلف فى خواصها الصخرية والتركيبية ، وقد تحدد نمط الصرف الأصل للمجرى المائى عند نحته للمجموعة العلوية ، وليس تبعا للمجموعة التى ينساب خلالها الآن .		إجهاد تفاضلى على الجسم يسبب مطه واستطالته .	
Suspended load	حمولة معلقة	Tephra	تفرا
المواد الدقيقة العالقة فى ماء مجرى مائى .		فتات نارى مفكك . مرادف فتات نارى pyroclasts .	
Suture	درز (التحام)	Terrace	شرفة (ج. شرفات)
نطاق تشوه فيه الصخور بشدة ، يميز مناطق تصادم قاريتين .		مصاطب طمية مستوية أعلى السهل الفيضى floodplain تمتدة على جانبي النهر ، وتوجد الشرفات عادة فى عدة أزواج ويكون مجرى النهر محصورا بين الزوج السفلى منها .	
S waves	موجة إس	Terrane	إقليم طوبوغرافى
موجات زلزالية جسمية تنبث كسلسلة من الحركات المتبادلة الجانبية فى الجسم الصلب ، وتسبب تغيرا فى الشكل لكن لا تنتقل فى السوائل أو الغازات ، وهى موجات قصر أو مستعرضة shear waves تسبب اهتزازا لجزئيات المواد الصلبة التى تمر خلالها فى اتجاه عمودى على اتجاه انتشارها .		منطقة واسعة من القشرة الأرضية ، لها سمات جيولوجية مميزة .	
Symmetrical fold	طية متماثلة	Tethys	بحر التيثيز
طية يميل جناحاهما بميل متساو على جانبي محورها .		بحر ضيق يفصل الجندوانا عن اللوريسيا .	
Syncline	طية مقعرة	Texture	نسج
طية مقعرة تأخذ شكل حوض .		الصفات العامة للصخر مثل حجم وشكل وترتيب الحبيبات المعدنية المكونة له .	
System	نظام	Thermal metamorphism	تحول حرارى
الوحدة الأساسية فى تصنيف التابع الطبقي إلى وحدات زمنية - طبقية .		انظر تحول تماسى contact metamorphism .	
T		Thrust fault	صدع دسر
Talus	ركام	صدع معكوس reverse fault ، يميل مستواه بزاوية صغيرة تقل عن 45 غالبا على معظم امتداده .	
تراكم من حطام صخرى يتجمع أسفل سفح مرتفع .		Tide	المد والجزر
Tar (asphalt)	قار (أسفلت)	ارتفاع ثم انخفاض مستوى سطح البحر خلال اليوم ، ينشأ بسبب قوة جذب القمر والشمس .	
زيت لزج وسميك جدا بحيث لا يمكنه الانسياب .		Till	حريث
		راسب غير مفروز ترسب مباشرة من جليد المثلجة .	
		Tillite	صخر الحريث
		صخر رسوبى غير مفروز مثلجى النشأة ، وهو حريث متصخر .	

Stalactite	هابط (ج. هوابط)	Stratosphere	الاستراتوسفير
راسب يتكون من معادن الكالسيت أو الأراجونيت يشبه جبل الجليد iciclelike أو الأسنان ، يتدل من سقف كهف ، ويتكون من تبخر وترسيب المحاليل في فجوات وشقوق الحجر الجيري .			الجزء العلوى من الغلاف الجوى ، بين 10 و 50 كم فوق سطح الأرض ، حيث تتكون طبقة الأوزون .
Stalagmite	صاعد (ج. صواعد)	Stratovolcanoe	بركان طباقى
راسب يشبه جبل الجليد ، يرتفع صاعدا من أرضية كهف أسفل الهوابط ، ويتكون بطريقة تكون الهوابط نفسها stalactites .			بركان غروطى حاد الجوانب يحتوى على طبقات من التفرا (الفتات النارى) ولابة لزجة . مرادف لبركان مركب composite volcano .
Star dune	كثيب نجمى	Streak	غدش
كثيب رملى على هيئة تل منعزل ضخم من الرمل تشبه قاعدته النجمة .			لون مسحوق المعدن ، ويحصل عليه بحك المعدن بسطح خشن صلب .
Stock	كتلة شاخصة (ستوك)	Stream	مجرى مائى
جسم صغير غير منتظم من صخر نارى متداخل ، أصغر من الباثوليث ، يقطع أسطح طباقية الصخور المتداخل فيها .			جسم مائى يعمل حبيبات فتاتية ومواد ذاتية تنساب إلى أسفل المنحدر في مجرى محدد .
Strain	انفعال	Stress	إجهاد
مقياس التغير في طول وحجم وشكل المواد نتيجة تعرضها للإجهاد stress . مرادف تشوه deformation .			قيمة واتجاه قوة التشويه .
Strata (singular stratum)	طبقات (مفرد. طبقة)	Striation, glacial	حز جليدى
طبقة مميزة من الرواسب تتجمع على سطح الأرض .			انظر تحزز جليدى glacial striation .
Stratobound mineral deposits	رواسب معدنية مقيدة الطباقية	Strike	مضرب
خامات الرصاص والزنك والنحاس وغيرها من الفلزات المحتواة في الصخور الرسوبية بطريقة تشبه تماما الرواسب الابتدائية ، أى التى تكونت في وقت الترسيب نفسه .			الاتجاه الذى يأخذته تركيب ما مثل طية أو صدع عند تقاطعه مع المستوى الأفقى .
Stratification	تطبق	Strike-slip fault	صدع مضربى الانزلاق
الترتيب الطباقى للرواسب والصخور الرسوبية والصخور النارية السطحية .			صدع تكون فيه الإزاحة أفقية وموازية لخط سطح الصدع .
Stratigraphic superposition, principle of	قاعدة تماق الطبقات	Stromatolite	استروماتوليت
في أى تتابع طبقي ، لم يقلب لاحقا ، يكون ترتيب الترسيب من أسفل إلى أعلى .			نظام بيولوجى معقد ، في شكل رواب وأعمدة من سيانوبكتريا هوائية ولاهوائية وطحالب ورواسب ناعمة .
Stratigraphy	علم الطبقات	Structural geology	جيولوجيا تركيبية
علم وصف ومضاهاة وتصنيف الطبقات ، خاصة في الصخور الرسوبية ، ويشمل وصف وتفسير بيانات ترسيب تلك الطبقات .			فرع الجيولوجيا الذى يدرس التشوه في الصخور .
		Subduction	عملية الاندساس
			العملية التى يفرض فيها غلاف صخري قديم بارد في الغلاف اللدن (الاستنوسفير) تحت لوح علوى راكب ، وتحدث عملية الاندساس عند حدود الألواح المتقاربة .
		Subduction zone	نطاق الاندساس
			نطاق طولى ضيق بين لوح محيطى ولوح علوى راكب ، وهو يتميز بنشاط زلزالى عال .

Shield	درع	Snowline	خط الثلج
منطقة واسعة تتكون من صخور قاعدة basement ثابتة قديمة داخل قارة .		خط الارتفاع الذي لا ينصهر ما يسقط فوقه من ثلج في فصل الصيف .	
Shield volcano	بركان درعي	Soil	تربة
بركان ينفذ لابة بازلتية غير لزجة ، ويبنى غروطا متسعا ضخما يشبه القبة تنحدر جوانبه بلطف شديد .		تجمع من الرمال والصلصال والدوبال على سطح الأرض ، وهي جزء من الحطام الصخري (الأديم) الذي يدعم نمو النباتات الجذرية .	
Silicate mineral	معدن سيليكاتي	Soil horizons	نطاقات التربة
معدن يحتوى على أيون سيليكات $(SiO_4)^{4-}$.		نطاقات أفقية لها خصائص مميزة ، تكونت نتيجة للتجوية الكيميائية والعمليات الأخرى التي تؤدي إلى تكون التربة .	
Silicon-oxygen tetrahedron	رباعي الأوجه للسيليكون والأكسجين	Soil profile	قطاع التربة
تركيب يتكون من أربع ذرات من الأكسجين تحيط بذرة من السيليكون وتكون اللوحدة البنائية الأساسية لمعادن السيليكات.		قطاع رأسى في التربة يظهر النطاقات المكونة لها .	
Sill	جدة موازية	Solifluction	دفع التربة
فريش أفقى متوازي الجوانب ، من صخر نارى متداخل ، يوازي أسطح طبقات الصخور المتداخل فيها .		حركة زحف بطيئة جدا للتربة والحطام السطحي المشبع بالماء و/أو الثلج ، وتحدث بسبب تجمد وذوبان الثلج بشكل تردى ، ويشيع في المناطق القطبية .	
Siltstone	حجر الغرين	Solubility	قابلية الذوبان (لمعدن)
صخر رسوبى يتكون أساسا من فتات معدنى في حجم الغرين .		قدرة المعدن على الذوبان في الماء ، وتساوى كمية المعدن الذي يذوب في الماء حتى يصل المحلول إلى نقطة التشبع .	
Sinkhole	حفرة بالوعة	Sorting	الفرز
منخفض دائري عميق مفتوح إلى السماء ، يوجد فوق صخور كربونية بها الكثير من الكهوف .		مقياس لمدى تقارب حجم حبيبات راسب أو صخر رسوبى .	
Slate	إردواز	Source rock	صخر مصدرى
صخر متحول منخفض الرتبة ، به انقسام إردوازي واضح .		صخر رسوبى يحتوى على مادة عضوية هي مصدر البترول .	
Slickensides	خدوش الصدع (مصلل سحجى)	Specific gravity	كثافة نوعية
أسطح بها حزوز أو مصقولة جيدا على أسطح الصخور الصلدة ، بريت نتيجة الحركة على سطح صدع .		رقم يعبر عن نسبة وزن المادة إلى وزن حجم مماثل من الماء النقى ، كما تساوى النسبة بين كثافة المادة المعطاة وكثافة الماء عند 4°م .	
Slip face	وجه انزلاق	Spheroidal weathering	تجوية كروية
المنحدر المستقيم المدابر للمريح lee slope في الكتيب الرمل .		خلع متوالى لرافات كروية من الصخر المتحلل السطح الخارجى لكتلة صخرية صلبة مستديرة نتيجة للتجوية الكيميائية أو الفيزيائية ويتبقى لب داخل كروى .	
Slump	تدهور	Spreading center	مركز الانتشار
نوع من التحرك الكتلى تكون فيه الحركة الدورانية للصخر أو الحطام الصخري (الأديم) على سطح منحدر مقعر .		حافة لوح نامية جديدة ، تنطبق على حيد وسط محيطى .	
Slurry flow	انسياب الطين المائع	Spring	ينبوع
كتلة متحركة من راسب مشبع بهاء محتبس بين الحبيبات وينتقل بسبب تحرك الكتلة .		انسياب الماء الجوفى طبيعيا إلى سطح الأرض .	

Sediment	راسب	Seismic gap method	طريقة الفجوة الزلزالية
حبيبات غير متساوية ترسبت على سطح الأرض بعوامل فيزيائية (مثل الرياح والماء والثلج)، أو كيميائية (بالترسيب من المحيطات والبحيرات والأنهار) أو بيولوجية (مثل الكائنات الحية).		وهي طريقة لتوقع موقع زلزال في المناطق ذات الاحتمالات العالية لحدوث زلزال في نطاق صدع نشط، اعتماداً على دراسة أجزاء الصدع التي لم يحدث فيها زلزال رئيسي لفترة زمنية سابقة.	
Sediment flows	انسيابات الراسب	Seismic sea waves	موجات بحرية زلزالية
انهيار كتل لمخاليط من الرواسب والماء والهواء.		موجات ذات طول موجي كبير في المحيط، تنتج عن الحركة السريعة والمفاجئة لقاع المحيط نتيجة لزلزال قوى، وقد تنشأ أيضاً من الانزلاقات الأرضية أو النشاطات البركانية تحت سطح البحر. وقد تسبب تلك الموجات تدميرًا شديداً في المناطق الشاطئية. مرادف تسونامي tsunami.	
Sedimentary basin	حوض ترسيب	Seismic surface wave	موجات سطحية زلزالية
منطقة واسعة (10000 كم ² على الأقل) تمثل موضع تجمع سمك كبير من الرواسب.		موجة زلزالية تتبع سطح الأرض فقط، بسرعة أقل من الموجات S.	
Sedimentary breccia	بريشيا رسوية	Seismic waves	موجات زلزالية
صخر فتاتي يتكون أساساً من فئات زوايا حبيباته كبيرة الحجم.		اضطرابات مرنة تنتشر بعيداً عن بؤرة زلزال.	
Sedimentary environment	بيئة رسوية	Seismograph	سيزموغراف (مسجل الزلازل)
منطقة محدودة جغرافياً تحفظ فيها الرواسب، ويميزها شكل تضاريسي ومناخ محددان، وأيضاً طاقة نسبية للماء وتيارات رياح ونشاط عضوي وانتشار نسي لختلف المواد الكيميائية.		آلة تستخدم في دراسة الهزات والتذبذبات التي يسببها الزلازل.	
Sedimentary facies	سحنة رسوية	Seismology	علم الزلازل
مجموعة الخصائص الصخرية والحويوية المميزة لأي وحدة رسوية، والتي تميزها عن غيرها من المجموعات السحنية المماثلة لها وتوجد في الوحدة نفسها.		دراسة الزلازل والموجات الزلزالية.	
Sedimentary rock	صخر رسوبي	Serpentinite	سريتينييت
صخر تكون بالترسيب الكيميائي أو بترسيب ولحام حبيبات معدنية نقلت إلى موضع الترسيب بالماء أو بالرياح أو بالجاذبية.		صخر يتكون أساساً من معدن السريتيني.	
Sedimentary structure	تركيب رسوبي	Shadow zone	نطاق الظل
تركيب في صخور رسوية أو متحولة قليلاً، تكون وقت الترسيب، ويشمل التطبق bedding والتطبق المتقاطع cross-bedding والتطبق المنحدر graded bedding وتشققات الطين mud cracks وغيرها.		نطاق بين 105° و 142° من مركز الزلزال epicenter لا يحدث فيه أي تخلل للموجات الزلزالية عبر القشرة بسبب الانكسار الموجي.	
Seismicity	زلزالية	Shale	طفل
التوزيع العالمي أو المحلي للزلازل في الزمان والمكان، وهو مصطلح عام يطلق على عدد الزلازل في وحدة الزمن.		صخر رسوبي فتاتي دقيق التحبب، يعيل للانفصال إلى رقائق على امتداد مستويات التطبق.	
Seismic belts	أحزمة زلزالية	Shear stress	إجهاد القص
مناطق واسعة من سطح الأرض تعرضت لهزات أرضية متلاحقة.		قوة تؤثر على الجسم تسبب تشققه أو انتقاله، ويسود في الصدوع الناقلة transform faults عند حدود الألواح الناقلة.	
		Sheeted dykes	قواطع صفاتحية
			مجموعة كبيرة من القواطع الرامية شبه متوازية.

Rockfall	سقوط صخري	Sand ripples	نيم الرمال (موجيات رمال)
السقوط الحر للمادة صخر أساس منفصلة من جرف أو منحدر شديد .		سلسلة من الأعراف (الحيود الطولية) الصغيرة المنتظمة نسبيا على سطح جسم من الرمل مثل الكثيب، وتكون قمم هذه الموجيات عمودية على اتجاه الرياح .	
Rock flour	دقيق صخري	Sandstone	حجر رملي
حبيبات صخرية دقيقة تنتج عند تكسير وطحن الصخور عند قاعدة المثلجة .		صخر رسوبي فتاتي حبيباته متوسطة الحجم في حجم الرمل (يتراوح قطرها بين 0.0625 و 2 مم) ، وتتكون عادة من كوارتز وفلسبار وفتات صخرية لحمت معا بزيادة لاحقة من الكوارتز والكربونات وغيرها من المعادن وأرضية من معادن الطين .	
Rock glacier	مثلجة صخرية	Saturated zone	نطاق التشبع
فص من فتات صخرية ملتصم بالثلج ، يتحرك ببطء أسفل المنحدر بطريقة تشبه المثلجة .		نطاق الماء الجوفي ، الذي تكون فيه كل الحبيبات ممتلئة بالماء .	
Rockslide	انزلاق صخري	Scale (of a map)	مقياس رسم
حركة سريعة مفاجئة لكتل متكسرة من صخر الأساس أسفل المنحدر عبر سطح منحدر .		النسبة من وحدة مسافة على الخريطة والوحدة التي تمثلها على سطح الأرض .	
Rock-stratigraphic unit	وحدة صخرية طباقية	Schist	شست
وحدة صخرية مميزة ، يمكن تعريفها بناء على خواصها الفيزيائية والتركيبية .		صخر متحول متورق ، وتري فيه نسبة المعادن الصفائحية بشكل واضح .	
Runoff	صرف سطحي	Schistosity	شستوية
جزء من المطر الساقط ينساب على سطح الأرض .		الترتيب المتوازي للمعادن الخشنة الحبيبات التي لها تركيب صفائحي مثل الميكا والكلوريت ، والتي تكونت أثناء عملية التحول تحت ظروف إجهاد تقاضلي .	
S		Sea-floor spreading, theory of	نظرية انتشار قيعان المحيطات
Sabkha	سبخة	نظرية وضعت في بداية الستينات تنص على أن قشرة محيطية جديدة تتكون من الصهارة الصاعدة عند حيرد وسط المحيط عندما تتحرك الألواح جانبيا بعيدا عن الحيرود .	
مسطح ملحي جاف فوق نطاق المد ، يوجد عادة على امتداد حواف البحار الضحلة الاستوائية مثل الخليج العربي .		Seamount	جبل بحري
Salinity	ملوحة	جبل بركاني منعزل ، يرتفع أكثر من 1000 متر فوق قاع البحر ومغمور كلية تحت الماء .	
مقياس ملوحة البحر ، ويعبر عنها عادة بعدد من الأجزاء في كل ألف جزء من الماء .		Secondary enrichment	إثراء ثانوي
Saltation	وثب	عملية تجوية كيميائية لراسب معدني كبريتيدي ، تؤدي إلى زيادة محتواه من الفلز .	
حركة حبيبة واسب إلى الأمام في سلسلة من القفزات القصيرة المتقطعة في مسارات قوسية .		Secondary waves	موجات ثانوية
Sandblasting	سفع الرمال	انظر الموجات S .	
عملية تجوية فيزيائية ، يتجوى فيها الصخر بسبب قذفه وتصادمه بحبيبات الرمل التي يحملها الرياح ، ويؤدي عادة إلى تكوين وجهر يجيات ventifacts من الحصى والزلط .			
Sand sea	بحر رمال		
منطقة واسعة مغطاة بالرمل المتحرك ، ويوجد بها تجمع هائل من الكثبان الرملية ، وتهب عليها الرياح بقوة . مرادف إرج erg .			

Remanent magnetism	المغناطيسية المتبقية	Rhyolite magma	صهارة ريوليتية
كمية من مغناطيسية الصخور نشأت عن المجال المغناطيسي للأرض عندما تكونت تلك الصخور . ويفيد قياس اتجاهها في تحديد المواقع القديمة للبيئة بالنسبة لخطوط الطول والعرض وقت تكون صخور تلك البيئة، وبالتالي الكتلة القارية .		أحد أنواع الصهارة الثلاثة الشائعة ، وتكون من 70 ٪ من وزنها ثاني أكسيد سيليكون SiO_2 .	
Replacement	إحلال	Richter magnitude scale	مقياس ريختر لقدر الزلازل
عملية يذوب خلالها محلول مادة ما موجودة فعلا ، وفي الوقت نفسه يرسب من المحلول حجم مساو من مادة أخرى .		مقياس مبنى على الساعات المسجلة للموجات الزلزالية الجسمية، لمقارنة كميات الطاقة الناتجة عن الزلازل .	
Reserves	احتياطيات	Rift	خسيف
رواسب من المعادن أو الفحم أو الزيت أو الغاز القابلة للاستخراج بالوسائل التكنولوجية المتاحة . ويطلق مصطلح "المخزونات المؤكدة" proven reserves على المخزونات التي أثبتت الدراسات أنها تتواجد بنوعية جيدة وكميات جيدة أيضا . انظر أيضا resources .		انظر خسيف graben .	
Reservoir	خزان	Rift valley	وادي خسف
مصدر أو مكان وجود المعادن في الدورة الكيميائية أو الدورة المائية .		حوض صدع تكون عند حد لوح متباعد أو منطقة شد أخرى .	
Reservoir rock	صخر خزان	Right-lateral fault	صدع يميني الانزلاق
جسم مسامي من الصخور يتجمع فيه البترول .		left-lateral fault . انظر صدع يساري الانزلاق	
Residual mineral deposit	راسب معدني متبق	Ripple	نيم
أي تركيز معدني على يتكون نتيجة للتجوية .		كتيب صغير جدا من الرمل أو الغرين silt ، يكون بعده الطويل عمودياً على التيار .	
Resources	موارد	Ripple mark	علامات نيم
رواسب معدنية أو فحم أو زيت أو غاز اكتشفت أو لم تكتشف ومتاحة للاستخدام حالياً ، أو قد تكون متاحة للاستخدام في المستقبل ، وتشمل الاحتياطيات بالإضافة للرواسب المكتشفة ولكن لم تستخرج لأسباب فنية أو اقتصادية ، كما تشمل أيضا الرواسب التي لم تكتشف بعد، ولكن قد يستدل على وجودها .		مجموعة من الأعراف (الثلال الصغيرة) المنتظمة شبه المتوازية ، المحفوظة في الصخر ، وتمثل توجهاً سابقاً على سطح الصخور الرسوبية.	
Retrograde metamorphism	تحول تراجعى	River	نهر
تغيرات تحولية تحدث عندما تنخفض درجات الحرارة والضغط.		مصطلح عام يطلق على مجرى مائي كبير نسبياً ، أو القروص الرئيسية لنظام نهري .	
Reverse fault	صدع معكوس	Rock	صخر
صدع تحرك فيه الحائط العلوي نسبياً لأعلى بالنسبة للحائط السفلي .		كتلة من مادة معدنية متماسكة ، صلبة غير حية، تكونت طبيعياً ، ويكون جزءاً من كوكب .	
Rhyolite	ريوليت	Rock avalanche	هيار صخري
صخر ناري بركاني دقيق التجب له تركيب الجرانيت.		حركة سريعة لكتلة من مادة صخرية على منحدر ، مما يؤدي إلى مزيد من التكسر للهادء .	
		Rock cycle	دورة صخور
		مجموعة العمليات الجيولوجية التي يتكون بها أي من الأنواع الثلاثة للصخور من النوعين الآخرين: فتتحول الصخور الرسوبية sedimentary rocks لتكون الصخور المتحولة metamorphic rocks ، أو تنصهر لتكون الصخور النارية igneous rocks . وكل الصخور قد ترفع وتعرض للتجوية فتكون رواسب sediments ، تنصخر لتكون صخوراً رسوبية.	

R

Radiation	إشعاع	Recumbent fold	طية مضطجعة
	انبعاث طاقة حرارية أثناء مرور الموجات الكهر ومغناطيسية .		طية يكون مستواها المحورى أفقياً .
Radioactivity	الإشعاع الذرى	Rectangular drainage	صرف متعامد
	تغير لحظى لنواة ذرة غير مستقرة إلى ذرة مستقرة ، حيث تتغير نواة نظير غير مستقر بإطلاق جسيمات أو إشعاع إلى نظير مستقر .		نظام قنوات تأخذ فيه كل قطعة مستقيمة لكل قناة أحد اتجاهين عموديين مميزين ، وتتبع عادة مجموعة من الفواصل .
Radiometric age	عمر إشعاعى	Recurrence interval	فترة تكرار
	الفترة الزمنية التى يحتوى فيها معدن ساعة إشعاعية داخله .		متوسط الفترة الزمنية اللازمة لتكرار حدث جيولوجى مثل فيضان أو بركان ، ويكون له سعة معلومة .
Radiometric dating	تأريخ بالطرق الإشعاعية	Reducing environment	بيئة اختزالية
	تقدير أعمار المواد الجيولوجية بقياس نسبة النظير المشع إلى نظيره غير المشع فيها .		بيئة يتعدم فيها الأكسجين ولا تتحلل المادة العضوية ، ولكن تتحول ببطء إلى كربون صلب .
Radioactive decay	اضمحلال إشعاعى	Reef	شعب (ج. شعاب)
	تغير نواة ذرة غير ثابتة إلى نواة أكثر ثباتاً .		تركيب يشبه العرف أو الحيد يتكون أساساً من البقايا الجيرية للكائنات البحرية القاعية مثل المرجان والطحالب . والبيئة المثل لنمو الشعاب تكون فى المياه الضحلة الدافئة المضطربة الغنية بالأكسجين وبمجاردة للشاطئ ، وتفصل الشعاب الحاجزة barrier reefs عن الشاطئ برف ضحل ، بينما يكون الأتول atoll عبارة عن حلقة من الشعاب يتوسطها لاجون مركزى . وتتم معظم الشعاب الآن فى البحار الضحلة بين خطى عرض 30° شمالاً وجنوباً .
Rainshadow	ظل المطر	Reflection	انعكاس
	منطقة قاحلة توجد على الجانب المداير لاتجاه الريح من السلسلة الجبلية ، حيث تكون كمية المطر الساقطة عليها أقل بشكل ملحوظ منها على الجانب المقابل للريح .		ارتداد موجة عبر السطح الفاصل بين وسطين .
Rank	رتبة (فحم)	Refraction	انكسار
	رتبة التحول التى وصل إليها ، وهى الأساس الذى يقسم الفحم طبقاً له إلى سلسلة تبدأ من اللجنيت إلى الأنثراسيت .		تغير فى السرعة يحدث عندما تنتقل موجة من وسط لآخر .
Rapids	جنادل	Regional metamorphism	تحول إقليمى
	منطقة فى مجرى النهر يكون التيار فيها أسرع من غيرها ، كما يكون السطح منكسراً لكن انحداره غير كاف لإحداث شلال waterfall . وتتكون الجنادل عادة عندما يجرى الماء فوق عدد متتابع من السلام الصغيرة ، أو عندما تحدث زيادة مفاجئة فى انحدار المجرى ، أو لوجود صخور شديدة المقاومة للتآكل فى مجرى النهر ، ولا تستعمل الكلمة بصيغة المفرد .		تحول يؤثر على مناطق واسعة من القشرة الأرضية ، ويؤدى إلى تغيرات ميكانيكية وكيميائية .
Recharge	إعادة الملء	Regolith	حطام صخرى (أديم)
	إضافة ماء إلى النطاق المشبع من نظام الماء الجوفى .		فريشة من حبيبات صخرية مفككة غير ملتصقة ، تغطى سطح الأرض .
Recharge area	منطقة إعادة الملء	Relative age	عمر نسبى
	منطقة يضاف فيها ماء إلى النطاق المشبع .		عمر حدث جيولوجى أو ظاهرة جيولوجية منسوباً لحدث جيولوجى أو ظاهرة جيولوجية أخرى ، ومعبراً عنه بوحدات مقياس الزمن الجيولوجى النسبى .
Recrystallization	إعادة التبلور		
	تكوين معادن متبلورة جديدة داخل صخر .		

Polar (cold) glacier مثلجة قطبية
مثلجة يكون فيها الجليد تحت نقطة الانصهار الضغطي في كل مكان ، ويكون الجليد متجمدا إلى قاعها .

Polymorph متعدد الشكل
مركب يوجد في أكثر من بناء بلوري ، كما يطلق على معدنين أو أكثر لها التركيب الكيميائي نفسه ولكن في بنية بلورية مختلفة ، مثل الكالسيت والأراجونيت .

Porosity مسامية
النسبة المئوية للحجم الكلي للمسام ، التي توجد في جسم ما من صخر الأساس أو الحطام الصخري (الآديم) .

Porphyroblast بورفيروبلاست
بلورة كبيرة وسط مادة لاحقة ناعمة ، في صخر متحول .

Porphyritic texture نسيج بورفيرى
نسيج من صخر نارى يتكون من حبيبات معدنية كبيرة تعرف بالبلورات الظاهرة phenocrysts في أرضية groundmass مكونة من حبيبات صغيرة من المعادن .

Porphyry بورفيرى
صخر نارى يتكون من حبيبات معدنية خشنة موزعة في أرضية من حبيبات معدنية دقيقة .

Porphyry copper deposit راسب نحاس بورفيرى
نوع من راسب معدنى حرارى يصاحب التداخلات النارية البرفيرية .

Pothole حفرة وعائية
فجوة نصف دائرية في صخر أساس bedrock قاع مجرى مائى ، تكونت بسبب كحت أو برى الحصى والزلط المتواجد في نيار مائى شديد .

Precipitate ترسيب
البلورات التي ترسب من علول مشبع .

Pressure melting point نقطة الانصهار الضغطي
درجة الحرارة التي يمكن أن ينصهر عندها الجليد ، عند ضغط معين .

Primary waves موجات أولية
انظر الموجات P .

Prograde metamorphic effects

تأثيرات تحول متصاعد
التغيرات التحولية التي تحدث عندما ترتفع درجة الحرارة والضغط .

Prokaryote بروكارىوتا
كائنات بدائية وحيدة الخلية ، ليس لها نواة واضحة .

Proterozoic البروتروزوى
الدهر eon الذى يلي الأركى ويسبق الفانيزوى .

Proton بروتون
جسيم مشحون بشحنة موجبة تساوى 1.6×10^{-19} كولوم يعبر عنها ب (1+) ، وكتلته تعادل كتلة 1832 إلكترون ، ويوجد في نواة اللدرة .

Pumice بيوميس (حجر الخفاف)
نوع من الزجاج البركاني ، له تركيب فلسى عمادة ، ويمتلئ بالثقوب والفجوات بسبب هروب الغازات أثناء التبريد ، وهى تشبه الإسفنج وكثافتها منخفضة للغاية . انظر الأوبسيديان obsidian .

P waves موجات بى
موجات ابتدائية جسمية زلزالية ، وهى أسرع الموجات المنبعثة من مصدر زلزالي ، تنبثق كنبضات تضاغية وانساقية متبادلة ، وغمر عبر المواد الصلبة والسائلة والغازية .

Pyroclasts فئات نارى
فئات صخرى اندفع أثناء ثورة بركان ، ويقسم عادة على أساس الحجم . مرادف تفرأ tephra .

Pyroclastic flow فيض الفئات النارى
انسياب غازات وفئات نارى ساخن يتحرك في هيئة سحابة متوهجة تندفع على المنحدرات بسرعة أثناء ثوران بركان .

Pyroclastic rocks صخور نارية فئانية
صخور تكونت من الفئات النارى .

Q

Quartzite كوارتزيت
صخر متحول أبيض اللون ، غير متورق nonfoliated ، شديد الصلابة ، تكون من الحجر الرملى ، غنى بحبيبات الكوارتز وتكون المادة اللاصقة فيه من الكوارتز أيضا ، ويتكسر الصخر عبر حبيبات الكوارتز وليس عبر المادة اللاصقة .

Physical weathering	تجوية طبيعية (فيزيائية)	Plateau	هضبة
مجموعة العمليات الفيزيائية التي تؤدي إلى تفتت مكاشف الطبقات إلى حبيبات صغيرة .			منطقة واسعة من الأرض المرتفعة عن المناطق المحيطة .
Pillow lava	لاية وسائدية	Plate rotation axis	محور دوران اللوح
لاية بازالتية تتكون تحت الماء ، عندما تنكسر عدة ألسنه صغيرة من اللابة على قاع البحر البارد ، وتتجمد فجأة إلى مكون صخري يشبه كومة من أكياس الرمل ، يتراوح حجمها بين عدة سنتيمترات ومتر أو أكثر .			محور دوران أحد ألواح الغلاف الصخري للأرض .
Placer	ركيزة (مراقد)	Plate rotation pole	قطب دوران اللوح
راسب فتاتي معدني ذو قيمة بتركيز عال بشكل غير عادي ، ترمب عادة ميكانيكيا بسبب كثافته الكبيرة .			النقطة التي يصل فيها محور دوران اللوح إلى سطح الأرض .
Planet	كوكب	Plate tectonics	نظرية تكتونية الألواح
جرم سماوي كبير يدور حول الشمس في مدار يفضاوى ، وتشمل الكواكب الداخلية inner أو الأرضية terrestrial وهى عطارد Mercury والزهرة Venus والأرض Earth والمريخ Mars ، وتتميز بأنها أصفر حجبا وكثيفة ومادتها صخرية ، أما الكواكب الخارجية أو الغازية ، وهى : المشتري Jupiter وزحل Saturn وأورانوس Uranus ونبتون Neptune وبلوتو Pluto ، فتتميز بأنها كبيرة الحجم وقليلة الكثافة ، وحافظت على معظم غازاتها الأصلية التي ورثتها من السديم الشمسي .			النظرية التي تدرس تكون الألواح وحركتها والعلاقة بينها والتشوهات التي تعثرها ، وكذلك محاولة تفسير الزلازل ونشأة البراكين وبناء الجبال وشواهد المغناطيسية القديمة في ضوء حركة الألواح فوق طبقة الغلاف اللدن (الأسستوسفير) .
Planetesimals	جسيمات كوكبية	Platform	رصيف
أجسام تشبه الشهب ، يعتقد أنها تكثفت من السديم الشمسي ثم تجمعت مع الغازات والتلج لتكون كواكب ابتدائية خلال الفترة بين 4.6 و 5.0 بليون سنة مضت .			منطقة مستوية غالبا من اليابس ، ثابتة تكتونيا ، ومغطاة برواسب .
Planetology	علم الكواكب	Playa	بلايا (بحيرة جافة)
دراسة مقارنة بين الأرض والشمس وغيرها من الكواكب .			قاع مستو لحوض مغلق جاف ، في منطقة صحراوية قاحلة ، غنى عادة بمعادن التبخرات ، وقد تغطيه بحيرة مؤقتة ، ويعرف الحوض في هذه الحالة ببحيرة البلايا playa lake .
Plankton	عوالق ، بلانكتون	Plume	بلوم
كائنات حية ميكروسكوبية تطفو على سطح الماء .			تيار صاعد يجعل الحرارة أو المواد المنصهرة جزئيا أو هما معا من الأجزاء السفلى للوشاح إلى الأجزاء العليا ، وقد يعزى النشاط البركاني داخل اللوح بعيدا عن حوافه إلى هذه البلومات .
Plastic flow	انسياب لدن	Plunge	غطس (الطية)
تشوه حجم أو شكل المادة دون تشققها .			الزاوية المحصورة بين محور طية والمستوى الأفقي .
Plate	لوح	Plunging fold	طية غاطسة
أحد وحدات الغلاف الصخري ، البالغ عددها اثني عشر أو أكثر ، تتحرك كوحدة مستقلة فوق الغلاف اللدن (الأسستوسفير) .			طية محورها مائل على الأفقي .
		Pluton	بلوتون
			جسم يتكون من صخر ناري متداخل تحت سطح الأرض ، بصرف النظر عن حجمه وشكله . كما يطلق المصطلح أحيانا على جسم ناري كبير تكون في أعماق القشرة الأرضية ، ولا يقل حجمه عن كيلومتر مكعب .
		Point bar	(حاجز حرق) جانبي
			راسب منحني الشكل ، يتكون من الرمل أو الجروزل على امتداد الجانب الداخلي ، لثنية مجرى نهر منعطف meander .

Pedalfer	بيدالفير	Petroleum	بتروöl
نوع شائع من التربة في المناطق الحارة ، يتميز بوفرة أكاسيد الحديد ومعادن الصلصال ، ترسب في النطاق-ب بالتجوية .		مواد غازية أو سائلة أو نصف صلبة توجد طبيعياً وتتكون أساساً من مركبات كيميائية من الكربون والهيدروجين .	
Pediment	بيدمنت (مسطح جبل)	Petrology	علم الصخور
سطح مائل يقطع صخر أساس ، ويغطي بطبقة رقيقة ومتقطعة من الطمي ، يتحدر بعيداً عن قاعدة أرض مرتفعة ، ويتكون في بيئة قاحلة عندما تؤدي التعرية إلى تراجع مقدمة الجبل .		فرع خاص من الجيولوجيا يهتم بدراسة تواجد وأصل وتاريخ الصخور .	
Pedocal	بيدوكال	Phanerozoic	دهر الحياة الظاهرة
نوع شائع من التربة في المناطق القاحلة ، تتميز من تجمع كربونات الكالسيوم في النطاق-ب .		أحدث دهور الأرض ، ويشمل تقريباً 600 مليون سنة الأخيرة من عمر الأرض ، وهو يمثل بصخور تحتوي على وفرة من الحفريات ؛ نظراً لأنها كانت حياة تحتوي على نوع من الهيكل . وهو ينقسم إلى ثلاثة أحقاب هي حقبة الحياة القديمة Mesozoic Era وحقبة الحياة الوسطى Paleozoic Era وحقبة الحديثة Cenozoic Era .	
Pegmatite	بجمايت	Phosphorite	فوسفوريت
صخر ناري متداخل خشن التحبب جداً ، يزيد فيه طول الحبيبات عن 3 سنتيمتر ، له تركيب ونسيج الجرانيت ، وتبلى البجمايت في المراحل النهائية لتصلب صهارة غنية بالماء .		صخر رسوبي يتكون أساساً من فوسفات الكالسيوم ، كنوع من معدن الأباتيت في شكل كسرات وعقيدات ، وهو خام أولى لمعادن الفوسفات والفوسفور .	
Perched water body	ماء جوفي جاثم	Photic zone	النطاق المضيء
جسم مائي يغطي قمة طبقة حابسة للماء ، تقع فوق منسوب الماء الجوفي الرئيسي .		المنطقة المتر العليا تقريباً من ماء البحار والمحيطات ، التي تتدفق فيها كمية من أشعة الشمس ، تكفي لحدوث عملية البناء الضوئي .	
Perched water table	منسوب ماء جاثم	Photosynthesis	عملية البناء الضوئي
السطح العلوي لجسم منفصل من الماء الجوفي ، والمنفصل عن جسم الماء الجوفي الرئيسي بصخر ماسك أو حابس aquiclude .		عملية تقوم فيها النباتات بمزج الماء وثنائي أكسيد الكربون لتكوين كربوهيدرات وأكسجين .	
Percolation	تخلل	Phreatic explosion	انفجار الماء البركاني
حركة الماء الجوفي في النطاق المشيع .		ثورة بركانية من بخار الماء شديد السخونة والطين والفئات سببها تمدد البخار الذي يتكون عندما تلامس الصهارة ماءً جوفياً أو ماء بحر .	
Peridotite	بريدوتيت	Phyllite	فيليت
صخر ناري بلوتوني فوقاني خشن التحبب ، لونه رمادي داكن وخضر ، يتكون أساساً من الأوليفين وقليل من البيروكسين والأمفيبول .		صخر متحول شديد التورق متوسط في درجة التحول بين الاردوز والشت ، ترى فيه المعادن الصفاتحية بالعين المجردة ، وتميل صخور الفيليت ؛ لأن يكون لها بريق لامع بسبب وجود بلورات الميكا .	
Period (geologic)	عصر	Physical Geology	الجيولوجيا الفيزيائية
الفترة الزمنية التي تتجمع خلالها صخور النظام system .		قسم رئيسي من علم الأرض (الجيولوجيا) يشمل دراسة العمليات والقوى التي تعمل على أو تحت سطح الأرض ، والمواد (المعادن والصخور والصهارات) التي تشملها وتؤثر فيها تلك العمليات .	
Permafrost	تربة الصقيع الدائم		
تجمع متجمد دائماً من الثلج والتربة ، يتواجد في المناطق شديدة البرودة .			
Permeability	نفاذية		
مقياس يعبر عن مدى قدرة سائل على النفاذ عبر المواد الصلبة .			

Outgassing	تفريغ غازي	Paleoecology	علم النباتات القديمة دراسة حفريات الأحياء بالنسبة للنباتات القديمة .
هجرة الغازات الطيارة والأبخرة عبر البراكين والينابيع الحارة من باطن الأرض إلى سطحها لتكون الغلاف الجوي وماء البحر .		Paleomagnetism	المغناطيسية الأرضية القديمة مغناطيسية متبقية في الصخور القديمة تسجل اتجاه الأقطاب المغناطيسية في وقت ما في الماضي .
Outwash	رواسب اكتساح	Paleontology	علم الحفريات دراسة الحياة القديمة وتطورها .
تكون متطبق ترسب من ذوبان ماء مجاري مائية .		Paleosol	تربة قديمة تربة تكونت على سطح الأرض ، ثم دفنت لاحقا وحفظت .
Overtaken fold	طية مقلوبة	Paleozoic	حقبة الحياة القديمة (الباليوزوي) أقدم أعقاب eras زمان الحياة الظاهرة (الفانيروزوي) .
طية مالت الطبقات في أحد جناحيها أكثر من الوضع الرأسي .		Pangaea	بانجيا اسم يطلق على القارة العملاقة التي تكونت من التحام كل الكتل القارية التي كانت توجد في العصرين البرمي والtriasي والتي تشمل كلا من الجندوانا ولوراسيا .
Oxbow lake	بحيرة قوسية (بحيرة قوس الثور)	Parabolic dune	كثيب قطع مكافئ (بارابولي) كثيب رملي على شكل حرف لـ ويكون الجانب المفتوح من الحرف في اتجاه هبوب الريح ، كما أن الذراعين المتدليين يشيران إلى الاتجاه المواجه للريح .
بحيرة ضحلة ، ذات شكل هلال ، تغطي فرعاً مهملًا من مجرى مائي ، تتكون عندما تقطع قناة المجري منحني دائري من النهر ثم تسير في مجرى مائي أقصر .		Paraconformity	شبه توافق أحد أنواع عدم التوافق ، يصعب تعرفه ، لأنه يعتمد على اختلاف عمر الطبقات التي تسفله عن تلك التي تعلوه .
Oxidation	أكسدة	Parent	ولود نواة ذرة تقوم باضمحلال إشعاعي . قارن بذرة وليدة daughter atom .
تفاعل كيميائي تفقد فيها الإلكترونات من الذرة وتزيد شحنتها الموجبة ، وهو اتحاد كيميائي بين العنصر والأكسجين .		Passive continental margin	حافة قارية مستقرة حافة قارية توجد في داخل لوح بعيدا عن حافته .
Oxidizing environment	مناخ مؤكسد	Partial melting	انصهار جزئي جزء من الوشاح أو القشرة ينصهر ليكون الصهارة ، فمثلا يبدو أن الصهارة الاندزيتية تمثل انصهاراً جزئياً انتقائياً للصوديوم والألومنيوم والسيليكا من مصدر غني بالحديد والماغنسيوم .
بيئة رسوبية تتميز بوجود الأكسجين ، وتتأكسد فيها البقايا العضوية سريعا إلى ثاني أكسيد الكربون والماء .		Peat	خث (بيت) راسب غير متماسك من البقايا النباتية ، يمثل الخطوة الأولى في تحول المادة النباتية إلى فحم .
Ozone	أوزون		
جزئ O ₃ يمتص الأشعة فوق البنفسجية من طبقة الاستراتوسفير .			
Ozone layer	طبقة الأوزون		
نطاق في الغلاف الجوي بين 15 و 30 كم فوق سطح الأرض غني بالأوزون ، تكوّن بسبب انشطار جزئ أكسجين بالأشعة فوق البنفسجية ، ثم تتحد ذرة الأكسجين تلك بجزء أكسجين آخر ، وحيث إن O ₃ غير مستقر فإنه يتكرر مرة ثانية . وهذه من العمليات المستقرة ، لأن الأوزون يتكون بمعدل تكمره نفسه . كما يوجد مصدر آخر مهم للتغذية العكسية ، حيث تمتص طبقة الأوزون معظم الأشعة فوق البنفسجية القاتلة من الوصول إلى سطح الأرض ، مما يجعل الأرض صالحة للحياة .			
Pahoehoe	باهوي هوي		
فيض لايي ذو سطح لزج وناعم ، مجذول في طيات ملتفة تشبه الحبل ، تتكون عادة من البازلت .			

Oceanic ridges	الحيود المحيطية	صخور الأوفوليت قاع بحر عميق مرفوع ، ويعتقد أنه يصاحب حدود الألواح المتقاربة .
	انظر حيد وسط المحيط midocean ridges .	
Oceanic rise	المرتفع المحيطي	Ore خام (ركاز)
	انظر حيود وسط المحيط midocean ridges .	تجمع من المعادن التي تكون عادة فلزية يمكن أن يستخرج منه معدن أو أكثر له قيمة اقتصادية . ويستخدم للمصطلح أيضا لبعض المعادن غير الفلزية مثل الكبريت أو الفلوريت .
Oil	زيت	Organic sediment راسب عضوي
	الجزء السائل من البترول .	راسب أو صخر رسوبي يتكون كلياً أو جزئياً من رواسب عضوية غنية بالكربون تكونت من تحلل مادة ذات أصل عضوي بعد دفنها ، ويشمل الفحم والطفل الغني بالكربون .
Oilfield	حقول بترول	Original horizontality أفقية أصلية
	مجموعة من أحواض البترول ، تكون متشابهة عادة ، أو حوض واحد في وضع منعزل .	ترسب الرواسب تحت الماء في طبقات أفقية أو شبه أفقية موازية لسطح الأرض .
Oil pool	تجمع زيتي	Original lateral continuity الاستمرارية الجانبية الأصلية
	تجمع من الزيت والغاز تحت سطحي ، في خزان محدد بحاجز جيولوجي .	استنتاج الامتداد الأصلي للطبقات التي تجحوت جزئياً الآن . ويجب معرفة هذا الامتداد لاستنتاج امتداد اليابس والماء في الماضي ، أو لبناء التراكيب ، التي تجحوت بشدة مثل الأنحاض الرسيخية cratonic arches .
Oil shale	طفل الزيت	Orogenic belts أحزمة تجبل
	طفل داكن اللون ، يجتوي على مواد عضوية شبه شمعية ، تتحلل إلى هيدروكربونات سائلة وغازية عند تسخينها .	انظر أوروجين orogens .
Oil trap	مصيدة بترولية	Orogen أوروجين
	تركيب تكوني أو رسوبي تمنع حركة الزيت أو الغاز لأعلى ، بينما تسمح بالتجمع خلف حاجز .	مناطق طولية أو مقوسة من القشرة الأرضية طويت وتصدعت بشدة ، وازداد سمكها بسبب التصادمات القارية لفترة زمنية طويلة . وقد تكون مواضع تقارب واندماس subduction
Oolite	سرة ، بطروخي	السواحل الغلاف الصخري ، وتتميز بالبراكين الأنديزيتية والباتوليتات الجرانيتية والمدود الجبلية mountain ranges .
	صخر رسوبي له تركيب الحجر الجيري ، يتكون من مكورات متوسطة قطرها 1 مم تسمى بطروخيات تتكون من طبقات دائرية ميكروسكوبية ، ترسبت من مياه ضحلة فوق مشبعة ، كما تدحرجت الحبيبات بشدة تحت تأثير الأمواج والتيارات .	Orogeny تجبل ، بناء الجبال
Oolitic limestone	حجر جيري بطروخي	عملية تشوهت خلالها مناطق واسعة من القشرة الأرضية ، ورفعت لتكون جبلاً .
	صخر رسوبي يتكون من تجمعات لأجسام جيرية دقيقة مستديرة يطلق عليها البطروخيات (السرثيات) oolites .	Outcrop منكشف
Open fold	طية مفتوحة	انظر منكشف طبقي exposure .
	طية يكون ميل طرفيها (جناحيها) لطيفاً ومتساوياً ، ويعبدا عن المحور .	Outer core لب خارجي
Ophiolite suite	مجموعة أوفوليتية	الجزء الخارجي من لب الأرض ، وهو يكون منصهراً .
	مصطلح أوروبي يطلق على تنابعات توجد في كثير من أحزمة الجبال ، تتكون من ثلاث طبقات من الصخور ، طبقة عليا من البازلت الوسائد pillow basalt ونطاق متوسط من القواطع الصفاتحية sheeted dykes وطبقة سفلى من الجابرو ، وتمثل	

Mudflow	انسياب طيني	Neutron	نيوترون
كتلة مناسبة ، تتكون أساسا من مادة صخرية دقيقة الحبيبات ، بها ما يكفي من الماء لجعلها في حالة ذائبة .		جسيم متبادل كهربيا ، تصل كتلته إلى 1833 ضعف كتلة الإلكترون .	
Mudstone	حجر الطين	Nonconformity	عدم توافق تبايني
صخر رسوبي فتاتي ، يتكون من حبيبات معدنية أدق من تلك التي توجد في الغرين .		علاقة عدم توافق تفصل صخورا رسوبية طباقية من صخور نارية أو متحولة .	
Mylonite	ميلونيت	Nonfoliated metamorphic rocks	صخور متحولة غير متورقة
صخر متحول دقيق التحبيب ، يوجد عادة في صدوع الدسر thrust faults وينتج عن التفتيت العنيف لصخور سابقة أثناء حركة الصدع .		صخور متحولة لا يوجد فيها أى تولية محددة للبلورات أو يوجد بها تولية ضعيفة ، ولذلك فهي تظهر قليلا من الانقسام الإردوازي أو الشستوزية أو تنعدم تماما .	
N		Normal fault	صدع عادي
Nappe structure	طية مفترية	صدع تحركت فيه الكتلة العليا إلى أسفل بالنسبة للكتلة السفلى على مستوى سطح الصدع ، ذو ميل حاد عامة .	
طيات مضطجعة (أقية) ضخمة تصاحب نطاقات صدوع دسر thrust faults ، تحركت من مواضعها الأصلية مسافات لا تقل عن ميل ، حيث تتوضع فوق صخور أخرى غريبة عنها عند حواف رسيخة craton margins . وفي الأحزمة الحديثة مثل الألب والهمبالايا أزيلت التجوية معظم أجزائها باستثناء جذورها .		Nuclear energy	طاقة نووية
Natural gas	غاز طبيعي	طاقة حرارية تنتج أثناء الانشطار أو الاندماج النووي المتحكم فيه .	
مكون بترولي غازي ، يتكون أساسا من الميثان .		Nucleus (of an atom)	نواة الليرة
Natural levee	جسر طبيعي	مجموعة البروتونات والنيوترونات الموجودة في مركز النواة .	
مرتفع منخفض واسع ، يتكون من طمي ناعم ، تبنيه مياه المجرى المائي ، عندما تفيض على جانبيه أثناء الفيضان .		O	
Nebula	سديم	O - horizon	نطق أو
انظر الفرضية السديمية nebular hypothesis .		طبقة مجمعة من الدبال humus ، وتمثل الطبقة العليا في كثير من تواجدات التربة .	
Nebular hypothesis	الفرضية السديمية	Obduction	امتطاء
إحدى فرضيات نشأة النظام الشمسي ، والتي تفترض أن سحابة دوارة من الغاز والرماد والتلج تكثفت وانكمشت لتكون النظام الشمسي (الشمس والكواكب المحيطة) منذ حوالي 4.6 إلى 5.0 بليون سنة مضت .		تجاوز أو تراكب كتلة سميكة من لوح ما فوق لوح آخر عند حد لوح متقارب .	
Neptunism	النيبتونيون	Oblique-slip fault	صدع مائل الانزلاق
نظرية قديمة اقترحها فاتر ، وتنص على أن كل الصخور بها في ذلك الجرانيت والبالزت قد ترسبت في محيط عالمي قديم .		نوع من الصدوع تشمل الحركة على جانبيه مركبتين إحداها أفقية والأخرى رأسية .	
		Obsidian	أوبسيدان
		صخر ناري يفيض داكن اللون ، يتكون كليا أو جزئيا من الزجاج ، وله تركيب فلسي عادة .	
		Oceanic crust	قشرة محيطية
		القشرة تحت المحيطات .	

Metasomatism	تحوال	Moho	موهو
العملية التي يتغير فيها التركيب الكيميائي للصخور ؛ نتيجة إضافة أو حذف أيونات من المحلول .		انظر انقطاع موهوروفيتش Mohorovičić discontinuity .	
Meteoric water	ماء جوى	Mohorovičić discontinuity	انقطاع موهوروفيتش
ماء المطر والصقيع والبرد والتلج .		انقطاع زلزالي يميز الحد بين قاعدة القشرة الأرضية crust والوشاح mantle .	
Meteorites	نيزك	Moh's Scale of hardness	مقياس موهز للصلادة
أجسام معدنية أو صخرية صغيرة تأتي من الفضاء وتصلطد بسطح كوكب .		مقياس للصلادة النسبية للمعادن يتحدد بالخدش ، وينقسم إلى عشر درجات ، تتميز كل منها بمعدن شائع .	
Midocean ridges	حيود وسط المحيط	Molasse	مولاس
حيود صخرية مستمرة على قاع المحيط ، يتراوح اتساعها بين عدة مئات إلى عدة آلاف من الكيلومترات ، كما يزيد ارتفاعها عن 0.6 كم .		مصطلح يطلق على الرواسب الفتاتية الخشنة ، التي تحتوى على تطبق متقاطع على نطاق واسع وتركيب مجرى channel structures وفحم ، وطبقات جفأ أحيانا ، وتكون غير بحرية عادة ، وتصاحب رفع أحزمة الجبال .	
Migmatite	ميجماتيت	Molecule	جزيء
صخر مركب ، يحتوى على بعض الصخور النارية والمتحولة .		أصغر وحدة تحمل كل خواص مركب ما .	
Mineral	معدن	Monocline	طية أحادية الميل
أى مادة صلبة متبلورة ، غير عضوية عادة ، تكونت طبيعيا ، لها تركيب كيميائي ثابت أو متغير في مدى محدود وبنية بلورية مميزة .		انحدار محلى في تتابع من الطبقات المائلة بانتظام .	
Mineral assemblage	تجمع معدني	Moraine	ركام جليدي (مورين)
نوعية ونسب المعادن الموجودة في صخر ما ، خاصة الصخور النارية والمتحولة .		تجمع من الفتات ترسب تحت أو على حافة مثلجة ، ولها سطح لايتفق مع صخر الأساس الذي يسفله .	
Mineral deposit	راسب معدني	Mountain chain	سلسلة جبال
حجم من الصخور يحتوى على وفرة من معدن أو أكثر .		مظهر جيولوجي يمتد طويلا على نطاق واسع ، يتكون من نظم عديدة ليست متشابهة في الشكل ولا متساوية في العمر ولكنها تشكل اتجاهها محدد .	
Mineral group	مجموعة معدنية	Mountain range	مد جبلي (ج. مدود)
معدن يظهر تبادلاً أيونياً واسعاً دون تغير في نسبة الكاتيونات إلى الأنيونات .		سلسلة جبال طويلة ، تتواجد كجزء من تتابع من المرتفعات الجبلية الممتدة طويلا ، وشديدة التقارب من بعضها ومتأثلة في الوضع والاتجاه والعمر والأصل .	
Mineralogy	علم المعادن	Mountain system	منظومة جبال
فرع من الجيولوجيا يهتم بدراسة تصنيف وخواص المعادن وتركيبها وثنائها وطريقة تكونها وأماكن وجودها .		مجموعة من المدود الجبلية المتشابهة في الشكل والتركيب ، وترجع نشأتها إلى الأسباب نفسها .	
Mineraloid	شبه معدن	Mudcracks	تشققات الطين
صلب شبه معدن يوجد طبيعيا ، ليس له تركيب بلورى أو تكوين محدد أو كليهما .		تشققات بسبب انكماش الطين الرطب عندما يجف سطحها .	
Modified Mercalli Scale	مقياس ميركالي المعدل		
مقياس يستخدم لمقارنة الزلازل بناء على شدة تدميرها .			

Magnetic anomalies	شاذات مغناطيسية	Mesosphere	الغلاف الأوسط
أي اختلافات محلية عن الشدة العادية (بالزيادة أو بالنقصان) للمجال المغناطيسى للأرض ، مثل خطوط الشاذات الضيقة المرجبة والسالبة على قاع المحيط الموازية لحيود وسط المحيط .		منطقة تقع بين قاعدة الأمثيوسفير والحد الفاصل بين اللب والوشاح .	
Magnitude	قدر الزلزال	Mesozoic	حقب الحياة الوسطى
انظر مقياس ريختر .		الحقب المتوسط في زمان الحياة الظاهرة .	
Mantle	الوشاح	Metallic bond	رابطة فلزية
النطاق السميك والكثيف ، والمكون من مادة صخرية تحيط بلب الأرض .		نوع من الرابطة التساهمية بين الذرات ، تشارك فيها الإلكترونات الحرة المتحركة بين أيونات العناصر الفلزية ، التي لها القدرة على فقد الإلكترونات وتتحد مع كاتيونات .	
Marble	رخام	Metallogenic provinces	أقاليم معدنية
صخر متحول عن الحجر الجيري ، يتكون أساسا من الكالسيت .		مناطق محدودة من القشرة توجد فيها الرواسب المعدنية بأعداد كبيرة .	
Mass number	رقم الكتلة	Metamorphic aureole	هالة تحول
جميع البروتونات والنيوترونات في نواة الذرة .		نطاق أو قشرة من الصخور المتحولة نتجت عن تحول تماسى وتحيط بمتداخل ناري .	
Mass wasting	انهيار كتلي	Metamorphic facies	سحنات تحول
حركة الحطام الصخري (الأديم) على المنحدر تحت تأثير الجاذبية الأرضية دون مساعدة من وسط ناقل .		تجمع من الصخور المتحولة يتكون كل منها من مجموعة من المعادن وصلت لحالة الاتزان أثناء التحول خلال مدى محدد من الظروف الفيزيائية (درجات حرارة وضغط) التابعة للسحنة المتحولة نفسها ، ويتغير التجمع المعدني في كل صخر عند الانتقال من سحنة لأخرى نتيجة التفاضل بين المعادن (وذلك للتركيب الكيميائي نفسه) .	
M-discontinuity	انقطاع - إم	Metamorphic grade	رتبة التحول
انظر انقطاع موهوروفيتش Mohorovičić discontinuity .		انظر رتبة grade (تحول metamorphosis) .	
Meander	منعطف	Metamorphic rock	صخر متحول
انحناء أو ثنية في مجرى نهر على شكل العروة .		صخر تحولت مكوناته الأصلية أو أنسجته أو كليهما إلى مكونات وأنسجة جديدة من خلال تفاعلات في الحالة الصلبة كنتيجة للضغط العالي أو الحرارة العالية أو كليهما .	
Mechanical deformation	تشوه ميكانيكي	Metamorphic zones	نطاقات تحول
تغيرات في نسيج صخر بسبب الطحن grinding أو الجرش crushing أو نمو التورق foliation أثناء التحول .		مناطق على الخريطة تقع بين خطوط تساوى رتبة التحول .	
Mélange	ميلانج	Metamorphism	تحول
خليط غير متجانس من مواد صخرية ، تكون الكسرات الصخرية فيه مختلفة التركيب والحجم والنسيج ، واختلطت وتصلدت نتيجة ضغط هائل عند حدود الألواح المتقاربة .		كل التغيرات التي تحدث في المحتوى المعدني ونسيج الصخر الرسوبي أو الناري في الحالة الصلبة في القشرة الأرضية كنتيجة للتغير في درجة الحرارة والضغط .	
Mercalli Scale	مقياس ميركالي		
انظر مقياس ميركالي المعدل .			
Mesa	ميسا (ريوة)		
شكل تضاريسي صحراوي ، عبارة عن أرض مرتفعة تشبه المنضدة ، ذو قمة مستوية من صخور مقاومة للتعرية وجوانب حادة ، أكبر من التل التضيد butte .			

Liquefaction	إسالة	Longitude	خط طول
	الإسالة السريعة لراسب نتيجة لصدمة مفاجئة مثل زلزال .		جزء من شبكة تستخدم في وصف المواضع على سطح الأرض ، تتكون من أنصاف دوائر تتصل بين أقطاب الأرض ، وتسمى أنصاف الدوائر بخطوط الطول meridians .
Limbs	طرفي الطية	Low grade of metamorphism	تحول منخفض الرتبة
	جناحا الطية على جانبي المستوى المحوري axial plane .		التحول تحت ظروف من الضغط والحرارة المنخفضين .
Limestone	حجر جيرى	Low velocity zone	نطاق السرعة المنخفضة
	صخر رسوبى يتكون من كربونات الكالسيوم (CO ₂) ، ويتكون أساسًا من فئات هياكل الحفرات اللاقارية .		نطاق في الوشاح العلوى (تحت عمق 100 إلى 350 كم) يحدد قاعدة الغلاف الصخري . ويتميز هذا النطاق بأن سرعة الموجات الزلزالية فيه تكون أقل منها أعلاه أو أسفله ، مما يدل على قلة جسوهته (صلابته) . ويبدو أن معظم حركات ألواح الغلاف الصخري تتركز في هذا النطاق .
Linear dune	كثيب طولى	Luster	بريق
	كثيب رملى هوائى على شكل حيد طولى ، يكون موازيًا تقريبًا لاتجاه الريح السائدة .		درجة وشدة انعكاس الضوء من سطح معدن ، ويوصف بصفات مثل مطفى (dull) ، أو زجاجى أو معدنى .
Lithification	تصخر	M	مائي
	عمليات التحول الفيزيائى والكيميائى ، التى تؤدى إلى لحام وتصلد راسب ليصبح صخرًا رسوبيًا .	Mafic	مصطلح يطلق على المعادن داكنة اللون الغنية في الحديد والماغنسيوم ، وفقيرة في السيليكا (مثل البيروكسين والأمفيبول أو الأوليفين) ، كما يطلق أيضا على الصخور الغنية في المعادن المافية .
Lithology	علم الخصائص الصخرية ، الليثولوجيا	Magma	صهارة
	مجموع خواص الصخر ، وتشمل النسيج والتركيب والمكونات الحفرية واللون وغيرها .		مادة صخرية منصهرة بها حبيبات معادن عالقة وغازات ذائبة ، تتكون عندما ترتفع درجة الحرارة ويحدث الانصهار في الوشاح والقشرة .
Lithosphere	الغلاف الصخري (الليوسفير)	Magma chamber	غرفة صهارة
	الجزء الخارجى الصلب للأرض ، ويقع فوق نطاق سرعة الموجات الزلزالية ، ويشمل الجزء العلوى من الوشاح mantle والقشرة القارية والمحيطية .		تجويف في الغلاف الصخري ، ممتلئ بالصهارة .
Lithospheric plates	ألواح الغلاف الصخري	Magmatic arc	قوس صهارى
	وحدات الغلاف الصخري ، كبيرة وغير منتظمة وتشبه الألواح ، حددت حوافها اليوم بنطاقات الزلازل النشطة الرئيسية .		سلسلة منحنية من النشاط النارى تقع فوق نطاق اندساس ، موازية لخطوط محيطى ومنفصلة عنه بـ 100 إلى 400 كم .
Load	حولة	Magmatic mineral deposit	راسب معدنى صهارى
	المادة التى تتحرك أو تنقل بواسطة عوامل نقل طبيعية مثل المجارى المائية أو الرياح أو المنسالج أو الأمواج أو التيارات البحرية .		أى تركيز معدنى محدود ، تكون نتيجة لعمليات صهارية في الصخر النارى .
Local base level	مستوى أساس محلى		
	أى مستوى أساسى غير مستوى سطح البحر ، لا يستطيع المجرى أسفل هذا المستوى تجويف الأرض .		
Loess	لويس		
	راسب هوائى غير متطبق ، غنى بمعادن الصلصال والرمل الناعم .		

Kerogen	كبروجين	Landslide	انزلاق أرضي
مادة عضوية غير قابلة للذوبان ، تشبه الشمع ، وتوجد في الصخور الرسوبية وخاصة الطفل .		حركة عكسوة لكتلة صخرية أو حطام صخري (أديم) regolith أو خليط من كليهما على منحدر .	
Key bed	طبقة دالة	Lapilli	لوبيات (حصي بركاني)
طبقة رقيقة منتشرة ، لها سمات رسوبية مميزة ، مما يسهل تعريفها ، ويميزها عن غيرها من الطبقات .		تفرا tephra يتراوح حجم حبيباتها بين 2 و 64 مم .	
Kimberlite	كمبرليت	Laramide orogeny	تجبل لاراميد
نوع من البريدوتيت الفوقالماني ومعه معادن الضغط المرتفع مثل الماس ، وينشأ عن التداخلات الانفجارية السريعة من الوشاح في القشرة .		حركة أرضية بانية للجبال في الكولدييرا ، امتد تأثيرها من نهاية العصر الطباشيري حتى الإيوسين الأوسط ، أدت إلى رفع صخور القاعدة العميقة في منطقة جبال روكسي ، مما أدى إلى تكوين جبال ضخمة تحصر بينها أحواضاً عميقة .	
Kimberlite pipes	أنابيب كمبرليت	Laterite	لاتيريت
كتل ضيقة من الصخور النارية تشبه الأنابيب ، تحتوى أحياناً على الماس ، وتتداخل في القشرة بيناً تنشأ في الوشاح العميق .		تربة حمراء داكنة مميزة ، تكونت في مناطق رطبة بها نسبة عالية من الألومنيوم والحديد ، وتنتج عن تجوية كيميائية سريعة لمعادن الفلسبار .	
Kinetic energy	طاقة الحركة	Latitude	خط عرض
الطاقة الناشئة عن الجسم المتحرك .		جزء من شبكة تستخدم في وصف المواضع على سطح الأرض ، وتتكون من دوائر متوازية تسمى خطوط العرض .	
L		Laurasia	لوراسيا
Laccolith	لاكوليث	الجزء الشمالي من قارة البانجيا كانت في حقب الحياة القديمة المتأخرة ، تشمل قارات أمريكا الشمالية وأوروبا وآسيا الحالية .	
متدخل ناري pluton عدسي الشكل ، تداخل موازياً لأسطح طباقية الصخور المتداخل فيها ، كما تنقوس طبقات صخور الإقليم لتكون قبة .		Lava	لاية
Lacustrine	بحري	صهارة وصلت إلى سطح الأرض عبر عنق بركاني .	
مختص بالبحيرة أو نتج عنها أو تكون فيها .		Leaching	غسل
Lagoon	لاجون	الإزالة المستمرة بالمحاليل المائية للمواد القابلة للذوبان من صخور الأساس أو الحطام الصخري (الأديم) .	
شرم في الشاطئ خلف شعب أو جزيرة موازية للشاطئ .		Left lateral fault	صدى يسارى الزلة
Lahar	لاهار (انسياب طين بركاني)	صنع مضرى الزلة تكون الإزاحة عليه بالصورة التي تبدو فيها على الخريطة ، وكان الجانب المواجه للمشهد قد أزيح إلى يساره .	
سريان طيني يتكون من رماد بركاني غير متماسك وتراب ويريشيا وجلاميد ، وينشأ عندما تختلط رواسب القنات الناري pyroclastic أو اللابة بالطر أو بهاء بحيرة أو نهر أو تلج ذاتب .		Levee	جسر
Laminar flow	انسياب رقائقى (صفائحي)	مرتفع على ضفة نهر ، تكون من رواسب خلفتها مياه الفيضان عندما تخف سرعتها .	
انسياب تكون فيه المسارات مستقيمة أو منحنية بلطف ومتوازية ، دون أن تختلط أو تتقاطع .		Lignite	لجنيت
Landform	مظهر تضاريسى	فحم منخفض الرتبة له قيمة سعرية carolific value بين البيت والفحم البتيومنى .	
مظهر تضاريسى يميز على سطح الأرض ، اكتسب شكله بسبب عمليات التعرية والترسيب ، مثل الودادى والتل .			

Intermediate grade of metamorphism

تحول متوسط الرتبة

التحول تحت ظروف انتقالية من الضغط والحرارة .

Internal processes

العمليات الداخلية

كل النشاطات التي يشملها حركة أو التغير الكيميائي والفيزيائي في صخور باطن الأرض .

Intrusive igneous rock

صخر ناري متداخل

أى صخر ناري تكون من تصلد الصهارة تحت سطح الأرض .

Ion

أيون

ذرة أو مجموعة من الذرات ، اكتسبت أو فقدت الإلكترونات ، ولهذا فهي تحمل شحنة كهربية .

Ionic bond

رابطة أيونية

رابطة تكونت بالجذب الإلكتروستاتيكي بين أيونات تحمل شحنات مختلفة .

Iridium

إيريديوم

معدن أرضي شحيح ، يقع في مجموعة معادن البلاتين ، نضب من القشرة الأرضية ، لكنه أكثر انتشارا في الوشاح والنيازك . يستخدم انتشاره عند الحد الفاصل بين العصرين الطباشيري والثالث كدليل على ارتطام الأرض بجرم سماوي .

Iron Formation

متكون حديد

صخر رسوبي صفيحي أو مترقق بانتظام ، تتبادل فيه راقعات الحديد مع طبقات من الشرت أو الجير ، ويحتوى على وفرة من الحديد تزيد عادة عن 15 % ، في صورة كبريتيد أو أكسيد أو هيدروكسيد أو كربونات ، حيث يكون خام الحديد منخفض الرتبة . ويوجد فقط في زمان الحياة المستمرة .

Island arc

قوس جزر

سلسلة طولية أو قوسية الشكل ، تتكون من جزر بركانية متوضعة على القشرة المحيطية ، ويتكون قوس الجزر في اللوح الراكب overriding plate من الصهارة المساعدة نتيجة اندساس لوح محيطي تحت لوح محيطي آخر ، ويكون موازيا لحدود محيطي عميق ومنفصل عنه بمسافة تتراوح بين 150 و 300 كم .

Isoclinal fold

طية متفكة الحبل

طية يكون جناحها متوازيين .

Isograd

أيزوجراد (خط تساوي رتب التحول)

خط على خريطة يصل بين النقاط التي تمثل بداية ظهور معدن ما في صخر متحول .

Isostasy

توازن الكتل ، أيزوستاسي

الخاصية الأساسية للتوازن الطفوئى بين أجزاء الغلاف الصخري .

Isotopes

نظائر

ذرات عنصر لها العدد الذرى نفسه ، وتختلف في أعداد الكتلة .

Isotopic dating

تقدير عمر

تقدير عمر صخر أو معدن باستخدام النظائر المشعة . وفي الحالة العادية ، فإن نسبة النظير المشع إلى النظير غير المشع في المعدن مضروبة في معدل التحلل تحدد الفترة الزمنية التي انقضت منذ كان النظير المشع يكون كل لمعدن ، أى منذ تكون المعدن أو عمره .

J**Joint**

فاصل

كسر في الصخر ، لا يظهر أى حركة للكتلتين على جانبيه .

Jovian planets

كواكب جوفيانية

كواكب ضخمة تقع في المناطق الخارجية للنظام الشمسى ، والتي تتميز بكتل ضخمة ، وكثافة منخفضة وضلاف هوائى سميك يتكون أساسا من الهيدروجين والهيليوم .

K**K- horizon**

نطاق ك

نطاق تربة يوجد في بعض المناطق الجافة تحت النطاق ب (B) ، ويكون مشبعًا بكربونات الكالسيوم .

Kaolinite

كاوليثيت

معدن شائع من مجموعة معادن الكاولين ، معادلته العامة $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ متأصل مع ذبكت وناكرت .**Karst topography**

طوبوغرافية الكارست

مجموعة من الأشكال التضاريسية غير المنتظمة ، تتميز بوجود حفر بالوعية sinkholes وكهوف مركبة caverns وانعدام المجارى المائية السطحية ، وتتكون في المناطق الرطبة عندما تذاب وتتقرب صخر الأساس الكربوناتي بالمياه الجوفية .

Hydrosphere	الغلاف المائي	Igneous rock	صخر ناري
مجموع الماء الأرضي ، ويشمل المحيطات والبحيرات والأنهار والماء الجوفي والتلج والجليد والمناجم .			صخر تكون من تبرد وتصلد الصهارة .
Hydrothermal activity	نشاط حرماي	Ignimbrite	إجنمبريت
أي عملية تشمل مياه جوفية ذات درجة حرارة عالية ، وخصوصاً تحول المعادن وتكوين نقاط ساخنة hot springs ويتابع حارة (فوارات) geysers .			نوع من الصخور النارية الفتاتية pyroclastic rocks ، تكون نتيجة الترسيب من مسحابة متوهجة nueé ardentes عند درجات حرارة عالية ، ويتكون من طبقات رديئة الفرز من طف متصلب يشتمل على اليوميس والحصى البركاني وكسرات من البلورات والصخور ، في أرضية من كسرات زجاجية ، ملتصقة مع بعضها عادة . ويتراوح تركيب الإجنمبرايت بين محض إلى متوسط ، كما يتميز بنسيج مخطط . مرادف طف ملتحم welded tuff .
Hydrothermal metamorphism	تحول حرماي	Index fossil	حفرة مرشدة (دالة)
نوع من التحول ، يحدث عادة عند الحيدود وسط المحيطية ، حيث تخرج السوائل الحارة عند القمة ، وتعمل على تحول الصخور المجاورة لها .			حفرة يمكن أن تستخدم في تعرف وتقدير عمر الطبقات التي تحتويها ، كما تفيد أيضاً في المضاهاة بين الوحدات الصخرية .
Hydrothermal mineral deposit	راسب حرماي	Index mineral	معدن دال
أي تركيز معلمي محلي تكون بالترسيب من محلول ساخن .			معدن يوجد في تتابع مكون من الصخور المتحولة ، تدل بداية ظهوره على الحد الحارحي لنطاق تحول محدد .
Hydrothermal solutions	محاليل حرماية	Inertia	قصور ذاتي
محاليل ساخنة تنشأ عن تبرد الصهارات أو نتيجة للتفاعل بين صخر ساخن والماء المحيط ، مما يؤدي إلى تركيز خامات معدنية .			المقاومة التي تهدبها كتلة ما للحركة المفاجئة .
Hydrothermal vein	عرق حرماي	Infiltration	تسرب
مجموعة من المعادن ترسبت عن المحاليل الحارة في تجويف صخري .			حركة المياه الجوفية ، أو المياه الحارة في صخر أو تربة عبر المسام والفواصل .
Iceberg calving	انفصال جبل جليد	Influent stream	جري مائي مؤثر (نهر مغذي)
تفتت كتل من الثلج ، عندما تتحرك إلى الشاطئ لتكوين جبال جليدية .			جري مائي أو جزء منه ، يعمل على إعادة الماء الجوفي عبر قاعه الذي يكون أكثر ارتفاعاً من مستوى الماء الجوفي في المنطقة .
Ice cap	قلنسوة جليدية	Inner core	اللب الداخلي
جسم من الثلج والجليد يشبه القبة يغطي قمم الجبال العالية ، وأيضاً الأراضي المنخفضة عند خطوط العرض العليا بالقرب من المناطق القطبية حيث تظهر انسياها شعاعياً للخارج . وتكون القلنسوة الجليدية أصغر حجماً من القريشة الجليدية ice sheet .			الجزء الصلب المركزي في قلب الأرض .
Ice sheet	قريشة جليدية	Inselberg	جبل منعزل (جزيري)
كتلة سميكة نسبياً من الجليد والثلج في حجم القارة تكوّن غطاءً متصلاً تفر كل يابس القارة حتى حافتها ، ولا يتوقف على شكل سطح الأرض تحتها ، ويقتصر وجود القريش الجليدية في الوقت الحالي على المناطق القطبية (جرينلاند وقارة أنتاركتيكا) .			جبل أو مرتفع أو تل مفرد ، حاد الجوانب يرتفع فجأة عن المناطق المنبسطة المجاورة .
		Intertonguing facies	تداخل مسحن لساني
			سحنتان رسوبيتان مثل الرمل والطفل بينهما علاقة جانبية متدرجة من إحداها إلى الأخرى ، بحيث يتداخل لسان طويل من أحدهما في الآخر . وتعدكس هذه الألسنة تكرار التحرك الجانبي لبيئات الترسيب المتجاورة أثناء ترسيب كلتا السحنتين .

Hand specimen	عينة صخرية	Hornfels	هورنفيلس
عينة صخرية بحجم مناسب لتحمل في اليد لندرس .		صخر متحول على الدرجة ، حبيباته متجانسة ، لا يوجد به تورق ، يتكون عادة بسبب تحول ثماني .	
Hanging valley	وادي معلق	Horst	جسر (نق)
وادي يتخلفه رافد tributary من مثلجة ذاتية يقابل وادياً مثلجياً أكبر حجماً حيث يكون قاع الرافد أعلى من قاع الوادي الرئيس .		كتلة طولية مرتفعة من القشرة الأرضية تحددها صدوع عادية normal faults متوازية . انظر خميف graben.	
Hanging-wall block	حائط علوي	Hot spot	نقطة ساخنة
الكتلة الصخرية الموجودة فوق سطح الصدع المائل .		سطح بركاني يشير إلى بلوم نشأ في الوشاح mantle.	
Hardness	صلادة	Hot spring	ينبوع حار
مقاومة المعدن النسيية للخدش .		ينبوع يزيد درجة حرارة الماء الخارج منه عن درجة حرارة الإنسان .	
Hard water	ماء عسر	Humus	دويال
ماء يحتوي على نسبة أكبر من المعادن من كبريتات الكالسيوم .		الجزء المتحلل من المادة العضوية في التربة .	
Heavy oil	زيت ثقيل	Hurricane	إعصار
زيت بترو خام له كثافة API ، أو كثافة بوميه منخفضة .		عاصفة استوائية هوجاء تزيد سرعة الرياح فيها 120 كم/ ساعة .	
Hercynian orogeny	التجبل الهرسيني	Hydration	تجيد
حركة أرضية بانية للجبال في الباليوزوي المتأخر تأثرت بها معظم أوروبا وجنوب آسيا ، وهي تكافئ تقريباً تجبل الأبالاش في أمريكا الشمالية وحزام جبال الأورال بين أوروبا وسيبيريا .		امتصاص للمعدن للماء أثناء التجوية .	
Hilatus	ثغرة ترسيب (ثلمة)	Hydraulic gradient	تدرج هيدروليكي
الفترة الزمنية المقابلة لعدم التوافق unconformity ، والتي تنشأ بسبب عدم الترسب بداية ، أو أنه ترسب ثم أزيل بالتجوية ، أو هو غياب لفترة زمنية من السجل الطبقي .		قيمة الانحدار منسوب الماء الجوفي water table ، ويحدد من قياس الفرق في الارتفاع بين نقطتين تقعان على مساره .	
High grade of metamorphism	تحول عالي الرتبة	Hydrocarbon	هيدروكربون
التحول تحت ظروف من الحرارة والضغط المرتفعين .		أي مركب عضوي (غازي أو سائل أو صلب) يتكون كلية من الكربون والهيدروجين .	
Hinge fault	صدع مفصل	Hydrologic cycle	دورة الماء
صدع تكون حركة أحد جانبيه دورانية على محور متماعد على مستوى الصدع وتتلاشى لإزاحته ، كلما تحركنا بعيداً على مضربه وتنتهي تماماً عند نقطة معينة .		الحركة الدورية للماء بين المحيط والغلاف الجوي ، حيث ينزل الماء أثناء المطر إلى سطح الأرض ، حيث تحمله المجارى المائية إلى البحر .	
Historical Geology	جيولوجيا تاريخية	Hydrology	علم المياه
دراسة الترتيب الزمني للأحداث الفيزيائية والبيولوجية الماضية في تاريخ الأرض .		العلم الذي يدرس جزء الدورة المائية بين سقوط المطر وعودة الماء إلى البحر ؛ أي دراسة حركة الماء وخصائصه فوق وداخل الأرض .	
Horn	قرن جليدي	Hydrolysis	تحلل مائي
قمة حادة مرتفعة هرمية الشكل ذات جوانب شديدة الانحدار ، تنتج من تقاطع حوائط ثلاث دارات جليدية cirques أو أكثر في قمة الجبل .		تفاعل كيميائي تحصل فيه أيونات الهيدروجين الموجبة أو الهيدروكسيد السالبة من الماء محل أيونات المعدن .	

Granite	جرانيت	الزجاجية) الموجات تحت الحمراء المنعكسة من سطح الأرض ؛ مما يؤدي إلى حبس الطاقة الشمسية وارتفاع درجة الحرارة .
صخر ناري متداخل خشب التحجب ، يحتوى على كوارتز وفلسبار بوتاسى وبلاجيوكلاز صودى ، ويكون الفلسبار البوتاسى أكثر انتشاراً من البلاجيوكليز ، بالإضافة إلى كميات من الميكا (بيوتيت و/ أو مسكوفيت) وغيرها من المعادن الإضافية .	Greenhouse gases	غازات الدفينة
Granitization	جرنتة	غازات الغلاف الجوى التى تسبب ظاهرة الدفينة الزجاجية مثل بخار الماء H_2O وثانى أكسيد الكربون CO_2 والميثان CH_4 و $CFCs$.
تكوين جرانيت نتيجة التحول من صخور أخرى بإعادة البلورة بالانصهار الكامل أو دونه .	Greenschist	شست أخضر
Granodiorite	جرانوديوريت	صخر متحول منخفض الدرجة ، غنى بالكلوريت والأليدوت .
صخر ناري متداخل فاتح اللون خشن التحجب يشبه الجرانيت ، ولكن يكون فيه البلاجيوكليز أكثر وفرة من الفلسبار البوتاسى . ويوجد بعض المورنيلند والبيوتيت ونادرا البيروكسين من المعادن الحليدوماغنيسية .	Greenstone belts	أحزمة الحجر الأخضر
Granulite	جرانوليت	نطاقات في القشرة الأرضية (تتبع الدهر الأركى أساسا) تتميز بوجود صخور بركانية تتميز بدرجة تحول منخفضة ، ويصاحبها صخور رسوبية فتاتية غير ناضجة .
صخر ناري متحول ، على درجة عالية من التحول ، خشن التحجب عادة ، ومتورق قليلا ، يحتوى على البيروكسينات والفلسبارات والجارنت .	Groundmass	أرضية
Gravel	جرول	مادة لاحمة دقيقة التحجب .
أخشن واسب فتاتى ، ويتكون غالبا من حبيبات أكبر من 2 مم وتشمل الحصى pebbles والزلط cobbles والجلاميسد boulders .	Groundwater	ماء جوفى
Gravimeter	جرافيمتر (مقياس الشاقل)	كل الماء الموجود في فراغات الصخور تحت النطاق غير المشيع .
آلة حساسة لقياس قوة الجاذبية في أى مكان على الأرض .	Groundwater table	منسوب الماء الجوفى
Gravity anomaly	شاذة ثقالية	السطح العلوى للنطاق المشيع بالماء الجوفى .
اختلافات في قوة الجاذبية بعد عمل تصويبات خط الطول والعرض .	Guyot	جويوت
Graywacke	جرايواكى	جبل بركانى مفرد ، شاهق الارتفاع وذو قمة مستوية، ويوجد تحت سطح الماء العميق .
حجر رملى ذو لون داكن غير متجانس الجيببات ، وغير ناضج نسيجيا . يحتوى على الكوارتز والفلسبار وكمية كبيرة من كسرات صخرية دقيقة	H	
Greenhouse effect	تأثير الدفينة (الصوبة الزجاجية)	دهر الهاديان
خاصية مناخ الأرض التى يمس أو يعكس فيها الغلاف الجوى المحتوى على بخار الماء وثانى أكسيد الكربون (أو زجاج الصوبة	Hadean	دهر eon يتبع زمان ما قبل الكامبرى ، وهو أقدم أزمنة العمود الجيولوجى .
	Half-graben	نصف أخدود
	Half-life	تركيب يشبه الخندق ، يتكون عندما يتحرك الحائط المعلق لأسفل على سطح صدع مائل .
		عمر النصف
		الزمن اللازم لاضمحلال نصف المادة المشعة الموجودة في عينة مادة مشعة إلى النظير isotope غير المشع . حيث سيبقى بعد فترة عمر نصف واحدة 50 ٪ من المادة المشعة ، وبعد فترة عمر نصف سيبقى 25 ٪ من المادة المشعة ، وهكذا.

Geosyncline	قمرة أرضية ، جيوسينكلاين	Glassy	زجاجي
حوض ضخم يستقبل رواسب سميكة أثناء هبوطه على امتداد فترات زمنية طويلة .			مصطلح يدل على أن المادة لا تحتوي على ترتيب للذرات في أشكال ثلاثية الأبعاد (مادة غير متبلورة) .
Geothermal gradient	تدرج حرارة الأرض	Glossopteris flora	فلورة جلوسوبتيريس
معدل تزايد الحرارة مع العمق في باطن الأرض ، ويكون هذا المعدل في حدود 30°م لكل كيلومتر في قشرة الأرض العلوية .			تشير إلى شجرة من عاريات البذور كانت تنتشر في مناطق الغابات المعتدلة في قارة الجندوانا الجنوبية خلال حقبة الحياة القديمة المتأخر وبداية حقبة الحياة الوسطى .
Geyser	فواره ، جيزر	Gneiss	نييس
عين حارة تمتلئ بنظام من الرماد والحرارة التي تسبب خروج قلذات متتابعة من الماء والبخار .			صخر متحول على درجة عالية من التحول ، خشن التجيب عادة ومتورق ، يتغير التركيب المعدني فيه من راق إلى راق ، والانفصام غير كامل .
Glacial drift	متجرف ملئجي	Gondwanaland	أرض الجندوانا
راسب تكون مباشرة من الثلجية أو بشكل غير مباشر من الماء الذائب من الثلجية في جدول أو بحيرة أو بحر ، كما يسمى أيضا متجرفاً drift .			الجزء الجنوبي من القارة العملاقة القديمة المسماة بالبانجيا ، والتي تكونت في حقبة الحياة القديمة المتأخرة ، قبل أن تنكسر بالقوى التي سببت الانجراف القاري continental drift ، وتتكون من أستراليا الحالية والهند وأفريقيا وأمريكا الجنوبية والقارة القطبية الجنوبية .
Glacial striations	حزوز جليدية	Graben (Rift)	أخدود
خدوش طويلة شبه متوازية على سطح صخر القاع نتيجة لحركة فئات صخرى وجد في قاعدة مثلجة . كما يطلق على الخدوش الأوسع والأعمق أحاديدي جليدية glacial grooves .			تركيب يشبه الخندق يتكون عندما تهبط كتلة صخرية بين صدمتين عاديين normal faults بالنسبة لما يحيط بها من كتل صخرية .
Glaciation	تثلج	Grade (ore)	رتبة (مستوى تركيز)
تغيير سطح الأرض نتيجة تحرك جليد الثلجية .			مصطلح يطلق على درجة تركيز المعدن (فلز أو فلزات) في الخام ore ، ويعبر عنه عادة بنسبة ،
Glacier	مثلجة	Grade (metamorphism)	رتبة (تحول)
جسم ضخم دائم من الجليد على سطح الأرض ، تكون أساسا من تبلور ثلج ، وتظهر عليه شواهد حركة مسابقة أو حالية على متحلل بسبب ثقل وزنها الخاص ، ويتراوح حجمها بين 100م و10000 كم .			المستوى الذي وصلت إليه عملية التحول ، مقاسة بكمية أو درجة الاختلاف عن الصخر الأصلي ، والصخر المتحول الناتج عنه .
Glacier surge	تجور مثلجة (اندفاع مدمر)	Graded bedding	تطبق متدرج
فترة من الحركة السريعة الغير عادية للمثلجة .			طبقة يتدرج فيها حجم حبيبات الرواسب من الخشن إلى أسفل إلى الناعم إلى أعلى .
Glaucinite	جلوكونيت	Gradient	انحدار
معدن أخضر سيليكاتي ، يتكون في بيئة بحرية بيضاء شديدة ، بها يسمح بتفاعل كيميائي بطيء بين ماء البحر ومعادن الطين أو الميكا الموجودة على قاع البحر . وحيث إنه يحتوي على بعض البوتاسيوم ، فإنه يستخدم في تحديد عمر الرواسب باستخدام طريقة البوتاسيوم/أرجون K/Ar .			مقياس للبعد الرأسى فوق مسافة أفقية معطاة .
Glass	زجاج		
صخر تكون نتيجة لتبرد الصهارة بسرعة ، بحيث لا يتاح للبلورات أن تنمو .			

Fossil fuel

وقود حفري

مصطلح عام يطلق على رواسب جيولوجية هيدروكربونية مكثفة ذات أصل عضوي ، وتشمل البترول والفحم والغاز الطبيعي والطفل البترولي oil shale والرمل القطراني tar sands.

Fractional crystallization

تبلور تجزئي

فصل مكونات الصهارة المتبردة بتكوين وإزالة بلوراتها على مراحل تتناسب مع درجة الحرارة .

Fracture (minerals)

مكسر (معادن)

التكسير غير المنتظم للبلورة عبر أسطح لا توازي وجه البلورة ، وتستخدم للفرقة بين المعادن .

Fracture

تكسر (تكتونية)

تشوه دائم في صخر عندما يتجاوز الإجهاد (الضغط) حد كس من التشوه المرن واللدن .

Fringing reef

شعب متاهم (سجاني)

شعب مرجاني يتصل مباشرة بكتلة من اليابسة لم يكونها شعب .

Fumarole

داخنة

ثقب بركاني صغير ، تنبعث منه الغازات والبخار ، وترسب على جوانبه المعادن .

G**Gabbro**

جابر

صخر ناري متداخل خشن التجيب له لون رمادي غامق ، يتكون أساساً من فليسيار البلاجيوكليز الغني بالكالسيوم (لايرادوريت إلى بيتونيت) والكلينوبيروكسين (أوجيت) . وقد يحتوى على معادن الأوليفين والأورثوبيروكسين ، ويخلو من الكوارتز ، والجابر هو المقابل المتداخل لصخور البازلت البركانية .

Gamma rays

أشعة جاما

موجات كهرومغناطيسية قصيرة جداً ، تنبعث من نويات الذرات أثناء تحولات إشعاعية خاصة .

Gangue

معادن غثة

المعادن عديمة القيمة الاقتصادية في الخام .

Geochemical cycle

الدورة الجيو كيميائية

مجموعة العمليات التي تجعل عنصراً كيميائياً معيَّناً من خزان إلى خزان آخر في النظام الأرضي .

Geochemically abundant elements

العناصر الكيميائية الوفيرة

العناصر الكيميائية التي يمثل كل منها منفرداً نسبة 0.1 % أو أكثر من وزن القشرة الأرضية .

Geochemically scarce elements

العناصر الكيميائية الشحيحة

العناصر الكيميائية التي يمثل كل منها منفرداً أقل من نسبة 0.1 % من وزن القشرة الأرضية .

Geologic column

عمود جيولوجي

شكل يجمع يشمل تاريخ الأرض ، يقوم على الترتيب الزمني لطبقات الأرض بناءً على محتواها الحفري أو أى شاهد آخر نسي أو مطلق .

Geologic cross section

قطاع عرضي جيولوجي

شكل يوضح ترتيب الصخور والمعادن التي يمكن رؤيتها إذا قطعنا مقطعاً رأسياً في جزء من القشرة الأرضية .

Geologic map

خريطة جيولوجية

خريطة توضح التوزيع الأفقي للصخور المختلفة أو الأصهار المختلفة في منطقة ما .

Geologic resources

موارد جيولوجية

مواد ذات قيمة اقتصادية من أصل جيولوجي ، يمكن استخراجها من الأرض ، سواء التي اكتشفت أو التي لم تكتشف بعد .

Geologic time

زمن جيولوجي

الفترة الزمنية الممتدة منذ نشأت الأرض إلى الآن ، وهي تقسم إلى فترات زمنية حدثت خلالها الأحداث الجيولوجية المعروفة خلال تاريخ الأرض .

Geologic time scale

مقياس الزمن الجيولوجي

تقسيم التاريخ الجيولوجي إلى عصور eon وأحقاب eras وعصور periods وأحيان epochs تستخدم في علوم الطبقات والحفريات .

Geology

الجيولوجيا

علم دراسة الأرض وتركيبها والمعادن والصخور والتربة المكونة للقشرة الأرضية والعمليات المختلفة التي طرأت ولا تزال تطرأ على كل من سطح الأرض وجوفها ، ودراسة بقايا الكائنات الحية في صخورها وتتابع طبقاتها واستنتاج تاريخها واستخدام كل ذلك في تتبع ثرواتها المختلفة .

Firn	ثلج جليدى	Fold	طية
snow	ثلج قديم كيف متصلب ، وهو مرحلة انتقالية بين الثلج والجليد ice .		طبقة أو مجموعة من الطبقات كانت أفقية ثم طويت لاحقا .
Fission tracks	مسارات انشطار	Fold axis	محور الطية
	علامات أو ندوب في المعادن والزجاج البركاني تنتج عن انشطار تلقائي في نواة ذرة غير ثابتة ، فيدفع جسيمات الطاقة في المادة المجاورة . وتنعكس كثافة المسارات عدد الذرات المنشطرة ، وبالتالي عمر الصخر الحاوى .		محور يصل كل النقاط على مركز الطية ، ويطوى منه جناحى الطية .
Fissure eruption	انثاق شقى	Fold belt	حزام طى
	طفع بركانى ، ينبثق من شق طولى أكثر منه من ثقب مركزي .		مرادف لحزام تجبل orogenic belt .
Fjord	فيورد (ج. فيوردات)	Folding	طى
	وادي جليدى سابق ، له جوانب حادة ، وعلى شكل حرف U ، ويغطيه البحر حاليا .		العملية التى تؤدى فيها قوى الضغط الجانبي إلى تشوه القشرة الأرضية ، بحيث تكون الطبقات الأرضية "طيات folds" .
Flash flood	فيضان مفاجيء	Foliation	تورق
	فيضان مفاجيء يصاحب عاصفة ممطرة شديدة ويستمر لفترات قصيرة بسبب تدفق كميات ضخمة من الماء ، وينقل خلالها كميات كبيرة من الرواسب .		مجموعة من المستويات الأفقية أو المتوجة في الصخور المتحولة ، تنتج عن تشوه تركيبى .
Flora	مجموعة نباتية ، فلورا	Footwall block	الحائط السفلى
	كل النباتات الموجودة في منطقة أو زمن ما .		كتلة الصخر أسفل منطع الصدع المائل .
Flood basalt	بازلت فيضى	Foraminifera	فورامينيفرا
	هضبة بازلتية ، تمتد منبسطة لعدة كيلومترات بعيدا عن انبثاقات بركانية شقية .		مجموعة من الكائنات الحية وحيدة الخلية ، تكون أصدافها معظم الرواسب الكربوناته في المحيطات .
Floodplain	سهل فيضى	Forearc basin	حوض أمام قوس
	رواسب مفككة متجمعة في هيئة طباقية أفقية ، تنتشر على جانبي مجرى مائى ، تغمر أثناء الفيضان ، وتتكون من الغرين والرمل التى يحملها المجرى المائى .		حوض يتكون بين القوس البركانى والخندق المحيطى في نطاق اندساس .
Flysch	فليش	Foreset bed	طبقة الواجعة في الدلتا
	مصطلح عام يطلق على الطبقات الأفقية الواسعة الانتشار ، والتى تتكون من تبادلات من الرمل والطفل . وتتميز بتابعات الحجر الرمل الذى تكونت بالتيارات التكميرية قبل الاصطدام التجبيل .		طبقة من الطبقات المائلة ، توجد في الطباقية الكاذبة cross-bedding ، أو طبقة مائلة ترسبت في جبهة الدلتا .
Focus of earthquake	بؤرة الزلازل	Formation	متكون
	الموقع الحقيقى لمصدر الزلازل تحت سطح الأرض . وتميز البه الضحلة الحيدود المحيطية ييسها تميز البؤر العميقة الأقوام البركانية .		الوحدة الصخرية المحلية الرئيسية في التقسيم الطبقي ، متجانسة لونا ونسجيا ومحتوى حفرئيا ، ولها اسم رسمى يشق من اسم منطقة جغرافية ، وله انتشار جغرافى واسع يسمح بتوقيمه على الخرائط ، مثل متكون المقطم Mokattam Formation .
		Fossil	حفرية
			بقايا أو آثار الحياة القديمة ، مثل العظام والأصداف والأسنان ، كما تشمل أيضا مواضع الأقدام والحفر وآثار جر الذيل وغيرها .

Erosion	تعرية	External processes	العمليات الخارجية
مجموعة من العمليات المعقدة ، يتكسر فيها الصخر فيزيائيا وكيميائيا ، ثم تتحرك الرواسب .		كل النشاطات التي تشمل تجوية ونقل وترسيب المواد المجوأة .	
Erratic	جلاميد منقولة	Extrusive igneous rock	صخر ناري منبثق
فتات صخري منقول ترسب بالثلجة ، تختلف في تركيبها عن طبقة الأساس التي تسفلها .		صخر تكون من تصلد صهارة انسابت على سطح الأرض .	
F			
Eruption column	عمود الثوران	Facies	سحنة
خليط من الرماد والغازات الساخنة ، ترتفع كعمود لأعلى فوق بركان نائر .		انظر السحنات الرسوبية sedimentary facies .	
Esker	كثيب نهر جليدي	Facies fossil	حفريات سحنة
حيد ضيق طويل ، جيبي غالبا ، يتكون من ركام متطبق .		أنواع من الحفريات يكون وجودها قاصرا على نوعية أو سحنة صخرية واحدة (مثل الجريتوليتات في الطفل الأسود) ، وبالتالي فإنها لا تكون مفيدة في المضاهاة بين هذه السحنة وغيرها من السحنات .	
Estuary	خليج نهري	Fault	صدع
جسم شبه مغلق من الماء الساحلي ، يتخفف فيه ماء البحر بهاء عذب .		كسر مستو أو منحني قليلا في القشرة الأرضية ، تنزلق الكتلتان على جانبيه إزاحة نسبية موازية لسطح لكسر .	
Evaporites	متبخرات	Fault Block Mountains	جبال الكتل الصدمية
صخر رسوبي يتكون أساسا من معادن ترسبت من سائل ملحي بالتبخير .		جبل تكون عندما تنكسر القشرة الأرضية إلى كتل مختلفة الارتفاع بصدوع عادية normal faults .	
Evaporite deposits	رواسب تبخرية	Fauna	مجموعة حيوانية ، فونا
طبقات من الأملاح ، تترسب كنتيجة للتبخير .		كل الحيوانات الموجودة في منطقة ما أو في فترة زمنية ما، أو كل الأنواع التابعة لقبيلة ما والمتواجدة في منطقة أو فترة زمنية محددة من الزمن الجيولوجي .	
(Evaporite intrusion) (salt dome)	تداخل تبخري (قبة ملحية)	Faunal succession, principle of	التتابع الحفري ، قاعدة
تداخل رأسى نتج من انسياب الملح أو الجبس اللدن من طبقة متبخرات مدفونة على عمق كبير ، ويكون غير متوازن إيزوستاتيكيا بسبب أنه أقل لدونة من الطبقات المغطية لها .		تتابع الحفريات الحيوانية والتبائية في تسلسل طباقى محدد معروف .	
Exfoliation	تقشر	Felsic	فلسي
تفكك القشور المتراكبة ، مثل قشور البصل ، حول قلب صخري صلب .		مصطلح يستخدم لوصف الصخور النارية ذات اللون الفاتح ، وتكون فقيرة في الحديد والمغنسيوم ، كما تحتوي على وفرة من الفلسبار والكوارتز .	
Evolution	تطور	Fermentation	تخمير
تغيرات تشريحية في المجموعات الحية مع الزمن ، بسبب التغير في جيناتها .		نشاط بكتيري يؤدي إلى تحلل الجزيئات العضوية الكبيرة ، ويحدث عادة في ظروف لاهوائية حيث يشع الأكسجين .	
Exploration geology	جيولوجيا الاستكشاف		
فرع علم الجيولوجيا الذي يهتم باكتشاف موارد جديدة من المعادن المستخدمة .			
Exposure (outcrop)	مكتشف		
مكان ، حيث ينكشف صخر أو راسب على سطح الأرض .			

Dripstone	حجر التنقيط	Effluent stream	جرى مائى متأثر
راسب تكون كيميائيا من تنقيط الماء في تجويف تحتى الهواء .		عجى يتلقى الماء من نطاق التشبع الأرضى ، حيث يقع قاع مجراه في منسوب منخفض عن منسوب الماء الجوفى .	
Drumlin	تل جليدى	Elastic deformation	تشوه مرن
تل منخفض مستطيل ناعم انسيابى ، يأخذ عادة شكل سفينة مقلوبة ، يتكون من الحريث till ، واتجاه استطالته هو اتجاه حركة الجليد .		تشوه غير دائم ، يحدث عندما تتمدد وتعصر مادة صلبة مرنة ، ثم تزال القوة المؤثرة عليها .	
Ductile deformation	تشوه لدن	Elastic rebound theory	نظرية الارتداد المرن
تشوه دائم لا يعود ، مستتج في مادة صلبة ، تعرضت لضغط فوق حد مرونتها ولكن قبل تشققها .		النظرية التى تنص على أن الزلازل تحدث بسبب انطلاق الطاقة المخزنة عبر الصدوع .	
Dune	كثيب	Electrons	الكثرونات
مرتفع من الرمل يترسب بالرياح عادة .		جسيمات مشحونة بشحنات سالبة .	
E		Emergence	انحسار
E horizon	مستوى-E	زيادة في مساحة الأرض تظهر فوق مستوى سطح البحر ، وتنتج من ارتفاع اليابس أو هبوط مستوى سطح البحر .	
أحد مستويات التربة ، يوجد أحيانا تحت المستوى أو يكون ذا لون رمادى أو أبيض .		Eolian	ريحي
Earth flow	انسياب ترابى	منسوب للرياح ، وخصوصا عمليات التجوية والترسيب ، وأيضا أشكال الأرض والرواسب الناتجة من فعل الرياح .	
انسياب حبيبات الحطام الصخرى (الأديم) regolith بسرعات تتراوح بين 10^{-5} و 10^{-4} م/ث .		Eon	دهر
Earthquake	زلزال	أكبر وحدات الزمن الجيولوجى .	
حركة عنيفة في الأرض ، تحدث بسبب انتقال الموجات الزلزالية المنبثقة من صدع حدثت حركة مفاجئة على امتداده .		Epeiric sea	بحر فوق قارى
Earthquake focus	بؤرة الزلزال	بحار ضحلة ، تغطى الرسيخات القارية على امتداد العمود الجيولوجى ، وتدعى البحار فوق القارية (epicontinental seas) حيث يعنى مقطع epi فوق .	
النقطة الأولى لاتبعث الطاقة المسببة للزلزال .		Epicenter	المركز السطحي للزلزال
Earthquake magnitude	قدر الزلزال	نقطة على سطح الأرض ، تقع مباشرة فوق بؤرة الزلزال .	
انظر مقياس ريختر . Earth & gravity		Epoch	حين
الجانزية الأرضية		الزمن الذى يترسب خلاله النسق series .	
قوة تؤثر على الأرض من داخلها ، تعمل بها الأرض على جذب كل الأجسام نحو مركزها .		Equilibrium line	خط الاتزان
Ecolite	إكلوجيت	خط يحدد مستوى على المجلدة ، يتساوى عنده الحجم الكلى المفقود والحجم الكلى المكتسب .	
صخر متحول خشن التحجب ويتكون من حبيبات متساوية تقريبًا ، يائىل في تركيبه الكيمايى صخر نارى قاعدى يمتدى على جارنت (بيروپ -التندين) وبيروكسين صودى (أمفاسيت) .		Era	حقب
		وحدة الزمن الجيولوجى ، وهو قسم أصغر من الدهر eon وأكبر من العصر period .	

Diatomite	دياتومايت	Discharge area	منطقة تصريف
صخر رسوبي يتكون نتيجة لتصخر الحمأ السيليكى .		منطقة تصريف الماء الجسوفى إلى المجارى المائية أو إلى الماء السطحي .	
Diatreme	دياتريم	Disconformity	عدم توافق تحالفى
ضرج أو منفذ بركائى امتلا بيريشيا بركانية عند الهروب الانفجارى للغازات .		سطح تجوية غير منتظم يقع بين طبقات متوازية .	
Differential stress	إجهاد متباين	Discontinuous reaction series	سلسلة التفاعل غير المتصلة
إجهاد لمادة صلبة ، لا يكون متساويا في جميع الاتجاهات .		تتابع التفاعلات غير المستمرة ، والذي تتفاعل خلاله المعادن مبكرة التكوين في الصهارة للتلووة مع السائل المتبقى لتتكون معادن جديدة ، انظر continuous reaction series .	
Differential weathering	تجوية متفاوتة (متباينة)	Dissolution	ذوبان (إذابة)
تجوية تحدث بمعدلات أو بشدة مختلفة كنتيجة للتغير في تكوين وتركيب الصخر .		عملية التجوية الكيميائية عندما تتحول المعادن والمواد الصخرية إلى محلول .	
Differentiation of the earth	تمايز الأرض	Dissolved load	حولة ذائبة
فصل مكونات الأرض الفيزيائية والكيميائية من كوكب ابتدائي متجانس لتكوين لب ووشاح وقشرة ومحيطات وغلاف جوى . وقد حدث معظم هذا الفصل في وقت مبكر من تاريخ الأرض ، وإن كان بعض التمايز لازال يحدث إلى الآن من خلال الشورات البركانية وبناء الجبال .		مادة ذائبة في ماء مجرى مائى .	
Dike	قاطع	Divergent plate margin	حد لوح متباعد
صخر نارى متداخل نضيدى ، له امتداد أفقى واسع ومحدود السمك ويقطع أسطح طباقية الصخور الحاوية له .		نوع من الحدود بين الألواح ، ويعرف أيضا بمركز انتشار spreading center ، حيث تتباعد الألواح عند نطاق الانتشار ويتكون عندها قشرة محيطية جديدة ، ويتميز بوجود صدوع الشد والبراكين البازلتية وطوبوغرافية وعرة وبؤر زلزالية ضحلة .	
Diorite	ديوريت	Divide	مقسم المياه
صخر نارى متداخل خشن التحجب له تركيب متوسط بين الجرانيت والجابرو ، يحتوى على فليساير البلاجيوكليس وأمفيبول ، وقد يتخلل من الكوارتز .		الخط الذي يفصل بين حوضين نهريين متجاورين .	
Dip	ميل الطبقة	Dolostone	حجر الدولوميت
الزاوية بالدرجات المحصورة بين المستوى الأفقى ومستوى مائل، مقاسة إلى أسفل في مستوى عمودى على مستوى المضرب .		صخر رسوبي يتكون أساسا من معدن الدولوميت (كربونات الكالسيوم والمغنسيوم) $CaMg(CO_3)_2$ ، يتكون عادة من الإحلال في الحجر الجيري $CaCO_3$ بإدخال أيون مغنسيوم محمول في الماء للتخلل .	
Dip-slip fault	صدع مائل الزلقة	Dome	قبة (تكتونية)
صدع عادى أو معكوس ، تحدث الحركة فيه فقط في مستوى عمودى على مضرب سطح الصدع .		تركيب دائرى (طية محدبة) له مقطع دائرى أو إهليجى تميل فيه الطبقات بقدر متساو من نقطة مركزية إلى الخارج في جميع الاتجاهات .	
Discharge	تصريف	Drainage basin	حوض صرف
كمية الماء التى تمر على نقطة معينة في مجرى مائى أثناء وحدة الزمن .		المنطقة الكلية التى تمد المجرى المائى بالماء .	

D	Deflation	تدريّة
Dacite	داسيت	إزالة الحبيبات المفككة بالرياح .
صخر ناري دقيق التحبب، له تركيب الجرانوديوريت.	Delta	دلتا
Darcy's law	قانون دارسي	جسم من الرواسب ترسب بفعل مجرى مائي، يصب في ماء هادئ .
العلاقة بين التفريغ ومعامل النفاذية والمعامل الهيدروليكي في الماء الجوف المتخلل .	Dendritic drainage	صرف شجري
Daughter-isotope dating	التأريخ بالنظائر الوليدة	نظام نهري يتفرع دون نظام، يشبه تفرع الشجرة .
مقارنة نسب مختلف النظائر الوليدة إشعاعية النشأة لتحديد عمر الصخور . ونظرا لأن النظائر الوليدة تتولد بمعدلات مختلفة، فإن نسبتها لبعضها البعض تتغير مع تقدم الزمن، مما يقدم أساسا لتقدير العمر .	Density	كثافة
Daughter atom	ذرة وليدة	العلاقة التي تساوي الكتلة على وحدة حجم .
ذرة تنتج من الاضمحلال الاشعاعي . قارن بالولد parent.	Denudation	تحات
Debris avalanche	هيال الحطام	مجموع عمليات التجوية والنقل وانسياب الكتلة والتعرية التي تؤدي إلى انخفاض مستوى سطح الأرض .
انسياب حبيبي نتيجة حركة الحطام الصخري (الأديم) regolith بسرعة كبيرة (أكثر من 10 م/ ث) على المنحدرات .	Desert	صحراء
Debris fall	سقوط الحطام	أرض جافة (قاحلة) أو مجلبة سواء تصحرت أم لا، ويكون فيها معدل سقوط المطر السنوي أقل من 250 مم، أو يزيد فيها معدل التبخر على معدل التساقط . وهي ليست بالضرورة منطقة ذات مناخ حار، حيث توجد أيضا صحارى في المناطق القطبية .
السقوط الحر النسبي أو انسياب الحطام الصخري (الأديم) من جرف أو منحدر حاد أو كهف .	Desertification	تصحّر
Debris flow	انسياب الحطام	غزو الصحراء للمناطق غير الصحراوية .
أحد أنواع انسيابات الطين اللزجة، حيث تحدث حركة على منحدر (عادة على المراوح الطينية) لكتلة من حطام صخري (أديم) غير متماسك، يكون حجم معظم مكوناتها أخشن من الرمل .	Desert pavement	رصيف صحراوي
Debris slide	انزلاق الحطام	أرض صحراوية مستوية مفروشة بالحصى تكونت نتيجة تدريّة deflation الرياح للمواد الدقيقة .
حركة الحطام الصخري (الأديم) على سطح مائل بسرعة تتراوح بين البطء والسرعة .	Desert varnish	ورنيش الصحراء
Decay series	سلسلة الاضمحلال	طلاء رقيق لامع، ذو لون غامق، يتكون أساسا من خليط من معادن الصلصال والمنجنيز وأكاسيد الحديد، على الأسطح الحجرية ومكاشف الصخور في المناطق الصحراوية نتيجة لطول فترة التعرض للتجوية، ويعرف أيضا بورنيش الصخر rock varnish .
التغير المتتابع للوولد وكل النظائر الوليدة الناتجة عن تحلله مثل تحلل اليوتاسيوم ^{40}K إلى أرجون ^{40}Ar والروبيديوم ^{87}Rb إلى استرانشيوم ^{87}Sr واليورانيوم ^{238}U إلى الرصاص ^{206}Pb .	Diagenesis	تغيرات ما بعد الترسيب
Decomposition	تحلل	التغيرات الكيميائية والفيزيائية والبيولوجية التي تؤثر على الراسب بعد ترسيبه الأصل، وذلك أثناء وبعد تحوله ببطء إلى صخر رسوبي، خلال عمليتي التخصّر lithification والكبس compaction .
تجوية الصخور كيميائيا .	Diastem	فصل
		فترة زمنية قصيرة نسبيا مفقودة من التتابع الطبقي .

Correlation	مضاهاة	وتتكون من مادة صخرية أقل كثافة من صخور الوشاح mantle التي تحفلها .
مقارنة الطبقات في منطقتين أو أكثر منفصلة جغرافيا عن بعضها، للوصول إلى تشابه في العمر . وتقوم معظم المضاهاة العادية على مقارنة الحفريات المرشدة، كما قد تعتمد على تقديرات عمر متشابهة من المواد المشعة أو انعكاسات قطبية الأرض المغناطيسية وغيرها .		
Country rock	صخر الإقليم	Crystal بلورة
الصخر الذي يتداخل فيه صخر ناري ، أو يتوضع فيه راسب معدني .		مركب صلب يتكون من ذرات أو أيونات تترتب بشكل منتظم في ترتيب ثلاثي الأبعاد ، كما ترتبط كيميائيا معا وتأخذ شكلا بلورياً .
Covalent bond	رابطة تساهمية	Crystal faces أوجه البلورة
قوة جذب بين ذرتين ، ملئت مستويات الطاقة لها بالاشتراك في الكترون أو أكثر .		الأسطح المستوية التي تحدد البلورة .
Crater	قوة (بركان)	Crystal form شكل البلورة
منخفض يشبه القمع ، مفتوح من أعلى ، يقع في قبة بركان ، تبيت منه الغازات والفتات الصخرى واللابة .		الترتيب الهندسي لأوجه البلورة .
Craton	رسيخة	Crystal habit هيئة البلورة
لب من صخر قديم في القشرة الأرضية ، يتميز بنبات تكتوني وايزوستاتيكي .		الشكل العام للبلورة ، مثل المكعب أو المخروطي .
Creep	زحف	Crystallization تبلور
حركة الحطام الصخرى (الأديسم) regolith البطيئة وغير المحسوسة أسفل المنحدر تحت تأثير الجاذبية الأرضية .		تكوين البلورات الصلبة من مواد غازية أو سائلة ، مثل تكوين المعادن المتبلورة من الصهارة .
Crevasse	شق جليدي	Crystalline متبلور
شرخ عميق في السطح العلوي للمثلجة .		انظر التركيب البلوري .
Cross bedding	تطبيق متقاطع	Crystal structure بنية بلورية
طبقات beds ورافتي laminae مائلة بالنسبة للطبقات الأكثر سمكا التي تحتويها وتوجد في الرواسب الحبيبية فقط ، مرادف cross-stratification و cross-lamination .		التشكل الهندسي الذي تأخذه الذرات في المادة الصلبة . وتعرف أي مادة صلبة لها بناء بلوري بأنها متبلورة crystalline .
Cross-cutting relationships	علاقة القطع المستعرض	Cuesta (=questa) كويستا
أي جسم ناري متداخل أو صاعد لابد أن يكون أحدث عمرا من الصخور التي يقطعها ، بينما يكون أقدم عمرا من التي تقطعه .		وحدة جيومورفولوجية لها جانبتين يكون أحدهما مائلا بلطف يوازي مستويات التطبيق ، بينما يكون الآخر مائلا بشدة في الاتجاه المعاكس ، ويستخدم أحيانا مصطلح escarpment or scarp كمرادف لكويستا .
Cross section	قطاع مستعرض	Curie point نقطة كوري
انظر قطاع جيولوجي عرضي geologic cross section .		درجة الحرارة التي لا يمكن أن تحتفظ المادة بمغناطيسية دائمة فوقها .
Crust	قشرة	Cutoff قطع نهري
الطبقة الخارجية الأقل سمكا في طبقات الأرض . وتقع فوق انقطاع موهوروفيتش Mohorovicic discontinuity ،		جري مجففر النهر في المنطقة الضيقة بين منعطين ليختصر طول مجراه تاركا خلفه بحيرات قوسية .
		Cycle of erosion دورة التجوية
		تتابع مقترح من التغيرات في شكل الأرض ، حيث يتغير من شكل مرتفع حاد كجبل ، إلى تلال منخفضة مستديرة ، ثم إلى النهاية إلى سهول مستقرة تكونيا .

Consequent stream	مجرى انحدارى	Continental slope	منحدر قارى
مجرى يحدد نظام جريانه اتجاه الانحدار الأرض .		انحدار واضح في قاع البحر بعد منطقة الرف القارى، ويمتد إلى السهل السحيق abyssal plane.	
Consolidated materials	مواد متماسكة	Continental volcanic arc	قوس بركانى قارى
راسب تصلب نتيجة لترسب معدن بين مكوناته .		سلسلة مقوسة من البراكين الأنديزيتية على القشرة القارية تكونت نتيجة الاندساس subduction. انظر قوس بركانى volcanic arc .	
Contact metamorphism	تحول تماسى	Continuous reaction series	سلسلة التفاعل المتصلة
تحول ينتج عن تأثير الحرارة والضغط الناشئ من صخر نارى متداخل مجاور ، ويسمى أحيانا تحول حرارى thermal metamorphism .		التغير المستمر في التركيب الكيميائى لخس المعدن من خلال إحلال أيونى مع تغير درجة الحرارة ، وكلما تبلورت الصهارة . انظر سلسلة التفاعل غير المستمرة discontinuous reaction series .	
Continental crust	قشرة قارية	Contour	خط المنسوب ، الكنتور
جزء القشرة الأرضية ، الذى يشمل القارات ، ويصل سمكه إلى 45 كم .		منحنى على الخريطة التضاريسية يصل بين النقط متساوية الارتفاع .	
Continental drift	انجراف قارى	Convection current	تيارات الحمل
فرضية تشرح تكون القارات نتيجة تكسر كتلة باسمة كبيرة وتحرك كتل الباسمة جانبيا ويبطء على سطح الأرض .		العملية التى تؤدى إلى صعود المواد الحارة الكثيفة لأعلى ، ويحمل معها مواد باردة كثيفة بالمحيط لأسفل ، مما يؤدى لتولد تيارات حمل .	
Continental glacier	مثلجة قارية	Convergent margin	حد لوج متقارب
مثلجة سمكية مستمرة تغطي مساحة تزيد على 50000 كم ² ، وتتحرك حركة بطيئة للغاية مستقلة عن المظاهر التضاريسية الثانوية . (قارن بمثلجة الوادى valley glacier) . انظر فريشة جليدية ice sheet .		نطاق تتقابل عنده الألواح المتحركة في اتجاه بعضها .	
Continental margin	حافة قارية	Coquina	كوكينا
الجزء من البحر أو المحيط الممتد بين خط الشاطئ وحافة السهل السحيق abyssal plane ، وتشمل الرف القسارى continental shelf والمنحدر القارى continental slope والمرتعق القارى continental rise .		حجر جبرى يتكون كلية أو غالبا من أصداف مفتة .	
Continental rise	ارتفاع قارى	Core	لب
منطقة تغير لطيف في الانحدار ، يتقابل عندها قاع حوض المحيط مع حافة قارة .		النطاق المركزى للأرض ، ويصل نصف قطره إلى 3471 كم ، بما يمثل 16 ٪ من حجم الأرض ، وله متوسط كثافة 10.7 جم / سم ³ . وتشير الموجات الزلزالية التى تمر في اللب إلى أن الجزء الداخلى له يكون صلبا بينما يكون الجزء الخارجى منه منصهرا ، ويفترض أنه يتكون أساسا من الحديد والنيكل مع كميات محدودة من الكوبالت والكبريت وربما بعض العناصر الأخرى .	
Continental shelf	رف قارى	Coriolis effect	تأثير كوريولى
رصيف بحرى مغمور ، متغير الاتساع ، يحيط بالقارة ، ويحده من الخارج للمنحدر القارى ، ويعرف أيضا بالرصيف القارى continental platform .		تأثير يؤدى إلى أن ينحرف أى جسم يتحرك بحرية فوق سطح الأرض نحو يمين اتجاه الحركة في نصف الكرة الشمالى ، بينما ينحرف ناحية يسار اتجاه الحركة في نصف الكرة الجنوبي .	
Continental shield	درع قارى		
منطقة متسعة من صخور ما قبل الكامبرى النارية والرسوبية والمتحولة مكشوفة من رمية craton سوتها عوامل التجوية .			

Cleavage	انقسام	Compaction	كبس (اندماج)
ميل العبدن للتكسر في اتجاهات مفضلة ، على امتداد أسطح مستويات انعكاس بزاوية .		نقص في السماية والحجم الكلي لراسب بسبب ترسب كمية إضافية من الصخور فوقه ، أو بسبب الضغوط الناشئة عن التشوه .	
Climate	مناخ	Competence (stream)	كفاءة (مجرى)
معدل ظروف الطقس في مكان أو منطقة ما خلال فترة تقدر بالسنين .		مقياس لأكثر حبيبة يستطيع أن ينفذها المجرى المائي ، وليس الحجم الكلي . قارن بالسعة capacity .	
Coal	فحم	composite volcano	بركان مركب
صخر رسوبي أو متحول ، لونه أسود قابل للاحتراق ، يتكون أساسا من تحلل مادة نباتية تحتوي على أكثر من 50 ٪ مادة عضوية .		مخروط بركاني مكون من طبقات من اللابة المتبادلة مع أخرى من الفتات الناري . مرادف: بركان طباقى stratovolcano .	
Coalification	تفحم	Composition (of a mineral)	تركيب (معدن)
المرحلة التي تمر بها مادة نباتية لتتحول أولا إلى خث (بيت) peat ، ثم لجنييت lignite ، ففحم شبه بيتوميئى subbituminous ، ففحم بيتوميئى bituminous coal ، فأنتراسيت .		النسب المختلفة للعناصر الكيميائية التي تكون معدن ما .	
Coast	شاطئ	Compound	مركب
شريط الأرض المجاور للمحيط أو البحر ويمتد بين أقل جزر ونقطة التفرع الرئيسى في شكل تضاريس اليابس .		خليط من ذرات عناصر مختلفة مرتبطة معا .	
Cobble	زلط	Compressional waves	موجات تضاغية
كسرة صخرية أكبر من الحصاة pebble وأصغر من الجلمود boulder يقع قطرها بين 84 و 256 مم ، كورت وهذبت حوافها بسبب البرى أثناء النقل .		انظر موجات P .	
Collision zone	نطاق الاصطدام	Concordant intrusion	متداخل متطابق
تكسر مختلف ألواح القشرة الأرضية لتكون أحزمة تجيلية . وهي قد تشمل تصادم قارة - قارة أو قوس - قارة أو قوس - قوس أو حيد - قارة .		صخر ناري متداخل له حدود موازية لأسطح الطباقية أو التورق foliation في صخور الإقليم المتداخل فيها .	
Colluvium	كولوفيوم (رسوبيات مترامكة)	Cone of depression	مخروط الانخفاض
رواسب مفككة غير متماسكة ، توجد على قاعدة المنحدرات وتتحرك أساسا بالتدحرج .		انخفاض مخروطي في منسوب الماء الجوفي يحيط بالئر مباشرة .	
Columnar joints	فواصل عمودية	Confined aquifer	مكمن ماء محصور
فواصل تقسم الصخور النارية إلى أعمدة أو منشورات رأسية .		خزان أرضي محصور بحاجس ماء aquiclude أو صخر مانع ، مرادف: Artesian aquifer .	
Comet	مذنب	Confining stress	إجهاد حاجس
جرم سماوي صغير يدور حول الشمس في مدار بيضاوي .		إجهاد (ضغط) متساوي في الصخور من كل الاتجاهات . يعرف أيضا بالإجهاد المنتظم uniform stress .	
		Conformity	توافق
		Conglomerate	كونجلومرات
		gravel	صخر رسوبي يتكون من فتات مدور في حجم الجبرول
			يلحم بإداة لائحة دقيقة الحبيبات .

Capacity (stream)	قدرة (مجرى مائي)	Channel	مجرى
كمية الرواسب والفئات التي ينقلها مجرى مائي عند نقطة معينة في فترة زمنية محددة .		المجرى الذي ينساب خلاله المجرى المائي، وعادة ما يوجد في أكثر مناطق المجرى انخفاضاً .	
Carbonate platform	رصيف جبري	Chalk	طباشير
منطقة ضحلة واسعة ، حيث ترسب كلا من الكربونات العضوية وغير العضوية .		الأصناف المتصلة للكائنات الحية الجيرية الدقيقة الطافية .	
Carbonate sediment, rock	راسب أو صخر كربوناتي	Chemical elements	العناصر الكيميائية
راسب أو صخر رسوبي تكون من تجمع المعادن الجيرية المترسبة عضوياً أو بطريقة غير عضوية ، وتشمل أساساً صخور الحجر الجيري والدولوميت .		المواد الأساسية التي يمكن أن تنفصل عندها المادة بوسائل كيميائية .	
Carbonic acid	حمض الكربونيك	Chemical sediments	رواسب كيميائية
حمض ضعيف ينتج من إذابة كميات محدودة من ثاني أكسيد الكربون في ماء المطر أو المياه الأرضية (الجوفية) .		رواسب تكونت بترسيب المعادن من محلول مائي ، ويكون عادة ماء البحر .	
Cataclastic metamorphism	تحول نهشيمي	Chemical weathering	تجوية كيميائية
تحول الضغط العالي ، أو التحول الذي يؤدي إلى تغير في النسيج بسبب تأثيرات ميكانيكية مثل السحق crushing والجز shearing وإعادة البلورة ، دون تغير في المحتوى المعدني ، يؤدي إلى تكوين صخر دقيق التحبب للغاية .		تحلل الصخور من خلال تفاعلات كيميائية مثل التميّه hydration والأكسدة .	
Catastrophism	نظرية الكوارث	Chert	تشرت
الليدأ الذي ينص على أن كل مظاهر القشرة الأرضية الرئيسية مثل الجبال والوديان والمحيطات قد نشأت بسبب عدد قليل من الأحداث الضخمة الكارثية .		صخر رسوبي يتكون من سيليكات ترسبت كيميائياً أو بيوكيميائياً .	
Cation	كاتيون	Cinder	غخروط حمم فتاتية
أيون موجب .		تل غخروطي شديد الانحدار يغطي بقصبة بركان يتكون من فتات ناري خشن يتطاير من القصبة بفعل الغازات الهاربة .	
Cementation	تلاحم	Cirque	دائرة الجليدي
عملية تحدث بعد الترسيب تتحول فيها الرواسب المفككة إلى صخر بترسيب المعادن في الفراغات الموجودة بين حبيباتها .		تجوف يشبه نصف فنجان الشاي قطع رأسياً ، مفتوح على جانب جبل ، حفر أساساً بتوحد صقيعي frost wedging واقتلاع plucking وتمزق الصخور بفعل الجليد .	
Cenozoic	حقب الحياة الحديثة	Clast	فتات
أحدث أحقاب زمان الحياة الظاهرة .		أي حبيبة وحيدة من راسب فتاتي .	
Central vent	هتق (مخرج) مركزي	Clastic sediment	راسب فتاتي
أكبر قصبة للبركان ، توجد في مركز غخروطه .		راسب أو صخر رسوبي تكون من حبيبات أو فتات ، نتجت عن تجوية صخر سابق ونقلت ميكانيكياً .	
Central eruption	انثاق مركزي	Clay	صلصال
خروج اللابة من فتحة مركزية بالنسبة للمخروط البركاني .		أحد معادن الألومنيوسيليكات المائية ، لها بناء بلوري صفائحي sheetlike ، تكونت من تجوية وتغيو سيليكات أخرى . كما تطلق على أي فتات معادن أصغر من 0.0039 مم .	

Blueschist	شست أزرق	المصاحف الزيت في آبار البترول ، وهو ماء حار شديد اللوحة
	صخر متحول تكون تحت ضغط مرتفع وحرارة منخفضة نسبيا ،	يحتوى أساسا على أيونات الكالسيوم والصوديوم والبوتاسيوم
	ويكتسب اسمه من وجود معدن الجلو كوفين وهو معدن	والكلور بالإضافة لعناصر أخرى بنسب محدودة .
	أمفيبول أزرق .	
Body waves	موجات داخلية (جسمية)	المادة التي تنكسر فجأة عندما تصل إلى حد لدونتها ، وعكسها
	موجات زلزالية تنتقل من بؤرة الزلزال إلى القشرة الأرضية.	المادة القابلة للسحب والطرق ductile material .
Bolide	نيزك	تحول بالدفن
	جسم يصطدم بالأرض ، قد يكون نيزكا أو كويكبا أو مذنباً .	التحول الناشئ عن دفن صخور رسوبية أو فتاتية نارية .
Bomb	قذيفة بركانية	تلى تضيدى
	حبيبة تقرا قطرها أكبر من 64 مم .	تل صخراوى مفرد ، ذو قمة مستوية وجوانب شديدة الانحدار،
Bond	رابطة	أصفر من الميسا mesa.
	القوة الدافعة الكهربائية التي تربط الذرات ببعضها لتكون	
	مركبات نتيجة لانطلاق الإلكترونات أو المشاركة فيها .	
Bottomset layer	طبقة القاع	C
	طبقة مسطحة من راسب دقيق الحبيبات ، تترسب على الجانب	نطاق -ج
	المواجه للبحر من الدلتا ، وتدفن لاحقا باستمرار نمو الدلتا .	أعمق نطاقات التربة ، ويقع تحت النطاق (أ) و/ أو النطاق
Boulder	جلמוד	(ب) في بروفيل التربة . ويكون ذا لون أصفر إلى بنى ، ويتكون
	كتلة صخرية منفصلة ومنقولة ، قطرها أكبر من 256 مم ،	من تجوية صخور أو راسب سابق .
	مستديرة إلى حد ما ، يظهر عليها أثر البرى والاحتكاك أثناء	ها جبرى
	عملية النقل ، وهو أكبر أقسام الفتات في الصخور الرسوبية .	راسب بحرى عميق يتكون أساسا من بقايا الهياكل الجيرية.
Bowen's reaction series	سلسلة بوين التفاعلية	Caldera
	وصف تخطيطى للمراحل التي يتبلور عندها المعادن المختلفة	كالديرا
	أثناء تبرد وتبلور الصهارة .	منخفض بركانى كبير يشبه حوض الترسيب ، يبلغ قطره عدة
Braided stream	مجرى مجعول (مضفر)	كيلومترات أو أكثر ، له جوانب راسية ، يتكون بعد ثورة بركان ،
	مجرى مائى ، يتكون من عدة أفرع تفصلها حواجز وجزر ، تلقى	يعتقد أنها تتكون نتيجة انهيار سقف غرفة الصهارة الحالية .
	في مجرى واحد مرة ثانية ، ويتكرر هذا عدة مرات ، مما يعطى في	التجبل الكاليدونى
	النهاية مجرى به عديد من المنعطفات الصغيرة .	حركة أرضية بانية للجبال حدثت في حقب الحياة القديمة
Breccia	بريشيا	المتوسطة (انتهت في السيلورى-الديفونى) ، أثرت على شمال
	صخر خشن التحبب يتكون من فتات صخرى زاي دقيق	غرب أوروبا وشرق جرينلند ، ونشأت عن الاصطدام بين هاتين
	الحبيبات وملتمح بإداة لاحة .	الكتلتين القاريتين .
Brine	أجاج (ماء مالح مر)	Caliche
	الماء الذى يعلأ الفجوات المسامية في أحواض الترسيب العميقة ،	كاليش (قشرة كلسية)
	أو الماء الموجود في أحواض معجوزة كالمح البحر الأحمر ، أو الماء	طبقة في بروفيل التربة ، صلبة غير مسامية غالبا ، تتكون من
		كربونات الكالسيوم البيضاء .
		انفصال جليدى
		الفتت المتلاحق لجبال الجليد في مقدمة الثلجة التى تنتهى في
		الياه العميقة.

Batholith	باتوليث	Benioff zone	نطاق بنى أوف
كتلة صخرية ضخمة غير منتظمة الشكل تقطع صخور الإقليم ، ويظهر منها على السطح 100 كم ² على الأقل. تتكون عادة من صخور نارية متداخلة ، ولكن قد تتكون أحيانا من صخور الإقليم تحت تأثير حرارة وضغط مرتفع.		نطاق ضيق معروف جيدا يور النشاط الزلزالي العميق ، ويقع تحت خندق قاع البحر .	
Bauxite	بوكسيت	Bentonite	بتونيت
صخر يتربك أساسا من أكاسيد الألمنيوم المائية ، تكون نتيجة للنجوية الكيميائية في مناطق مدارية بنظام صرف جيد . وهو خام الألمنيوم الرئيسى .		رماد بركاني يستقر على قاع البحر ويتحول لاحقا إلى صلصال .	
Bay	شرم	Beta particle	جسيمات بيتا
انحناء واسع مفتوح أو شرم من بحر أو بحيرة في كتلة بابسة مجاورة .		الكثرون انطلق من نواة ذرة أثناء تحول إشعاعى معين.	
Beach	شاطئ	Biochemical sediment, rock	راسب أو صخر كيميائى أو حيوى
راسب غسلة الموج على امتداد الشاطئ ، يمتد خلال نطاق حركة الأمواج .		راسب أو صخر يحتوى على بقايا معدنية من الكائنات الحية مثل الأسفاد ، أو معادن ترسبت من مواد ذاتية في المياه نتيجة لعمليات بيولوجية مثل ما يحدث في تكاثرين الحديد .	
Beach drift	انجراف شاطئ	Biogenic rock	صخر أو راسب حيوى النشأة
الحركة غير المنتظمة للحبيبات على امتداد الشاطئ ، حيث تتحرك الحبيبات إما بانحراف أعلى منحدر الشاطئ تحت تأثير الأمواج المتلاطمة أو في مسار مستقيم أسفل هذا المنحدر تحت تأثير الأمواج المرتدة.		صخر أو راسب تكون من بقايا عضوية (حفريات) .	
Bed	طبقة	Biosphere	الغلاف الحيوى
أصغر وحدة رسمية في جسم مكون من صخور رسوبية أو رواسب . (انظر طبقة strata) .		ويشمل كل الكائنات الحية التى تعيش على الأرض ، وأيضا كل المادة العضوية التى لم تتحلل تماما . وهو يشمل أجزاء الغلاف الصخرى والجوى والمائى التى يمكن أن توجد بها كائنات حية .	
Bedding	نطبق	Biotic	حيوى
الترتيب المتتالى للطبقات في أى جسم من الرواسب أو الصخور الرسوبية ، حيث تفصل أسطح مستوية ومتوازية طبقات مختلفة في حجم الحبيبات أو التركيب والتى ترسبت في أزمنة مختلفة .		تابع للنباتات أو الحيوانات .	
Bedding plane	مستوى التطبيق	Bloturbation	تقليب (اضطراب) حيوى
السطح العلوى أو السفلى للطبقة .		أن تعيد الأحياء استخدام الرواسب الموجودة حولها.	
Bed load	حمل القاع	Bituminous coal	فحم بيتومينى
حبيبات الرواسب التى تتحرك على قاع مجرى نهر بالدرجة rolling والثوب (القفز) saltation.		أعلى درجات الفحم ، وهو يعرف غالبا بالفحم الأسود.	
Bedrock	صخر الأساس - صخر القاع	Block faulting	تصدع كتلى
الكتلة المستمرة من الصخر الصلب التى تكون القشرة.		فتت أو تكسر القشرة الأرضية بسبب الشد الناتج عن انزلاق كتل الصدوع المتوازية بالنسبة لبعضها البعض .	
		Blocking temperature	درجة حرارة الانسداد
		درجة الحرارة التى يصبح عندها معدن ما نظام كيميائى مغلق بالنسبة لسلسلة تحلل إشعاعى ما عند تبرده ، وتعتمد نسبة العنصر المشع إلى النظير غير المشع متى حدثت هذه الدرجة .	
		Blowout	كتيب انطلاق
		(1) كتيب رمل هوائى على شكل قطع مخروطى ، يمتد بعيدا عن الشاطئ ، ويكون له مسقط رمل محدب يتجه تحت مستوى الرياح . (2) منخفض ضحل في الرمال أو التربة الجافة ، له شكل دائرى أو بيضاوى ، تكون بسبب تجمية الرياح .	

Atoll	أتول	Badland	أرض وعرة
شعب مرجاني له شكل دائري عامة، ويحتوي لاجون ضحل في وسطه.		شكل تضاريسي يتميز بنظم تجوية مجارى مائية معقدة، ويوجد على أسطح مغطاة بغطاء نباتي عدود أو خال من الغطاء النباتي تماما، يغطي رمالاً وغريناً وطفلاً غير متساك، أو متساك قليلاً.	
Atom	ذرة	Bajada	بجادا
أصغر جسيم مفرد، يحمل كل الخصائص التي تميز العنصر التابع له.		سياج من الرواسب متسع في مقدمة جبل تكون من تلاقى عدة مراوح طمية متجاورة.	
Atomic number	العدد الذري	Barchan dune	كتيب برخان
عدد البروتونات الموجودة في نواة الذرة.		كتيب رملي هوائي ذو شكل هلال، يتحرك عبر سطح مستو، حيث تشير نقطتا الهلال (القرنان horns) إلى الجانبين المتدابر للريح. ويكون جانبيه للمحدب في اتجاه الريح بينما يكون جانبيه المقعر عكس اتجاه الريح.	
Atomic substitution	إحلال ذري	Barrier reef	شعب حاجزي
انظر الاحلال الأيوني ionic substitution.		شعب مرجاني يفصله عن اليابس لاجون.	
Atomic weight	الوزن الذري	Basal slip	قطاع قاعدي
مجموع كتلة البروتونات والنيوترونات الموجودة في نواة ذرة عنصر.		انزلاق الثلجة على قاعدتها.	
Axial plane	المستوى المحوري	Basalt	بازلت
مستوى تخيلي يقسم الطبقة إلى قسمين متماثلين تقريبا، ويمر عبر محور الطبقة.		صخر ناري مائي ذو لون رمادي إلى أسود، يتكون أساسا من فليساير بالاجير كاليز كلسي وببروكسين، وهو المقابل السطحي للجابرو.	
Axis	محور (الطبقة)	Basaltic magma	صهارة بازلتية
خط متوسط بين طرفي (جناحي أو ذراعي) الطبقة يمر عبر قمة crest الطبقة المحدبة أو قاع trough الطبقة المقعرة.		أحد الأنواع الثلاثة الشائعة من الصهارة، وتحتوي على 50% من وزنها من ثاني أكسيد السيليكون SiO_2 .	
Aufacogen	أولاكوجين	Base level	مستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية)
خفيف محصور بصدع ممتد عموما في حافة رسيخة ويمتلئ بطبقات سمكية، يعتقد أنه تكون عندما بدأت قارة عملاقة في التفتت.		مستوى محدد لا يستطيع المجري المائي أسفله أن يقوم بعملية النحر، وغالبا ما يكون هو مستوى سطح البحر أو مستوى بحيرة.	
Axis of spreading	محور انتشار	Basement rocks	صخور القاعدة
محور افتراضي يوضح دوران لوح أو زوج من الألواح، وهو ليس محور الدوران الجغرافي للأرض.		تجمع معقد من الصخور النارية والمتحولة، تأتي أسفل كل المكونات الرسوبية، وتكون أقدم للصخور المعروفة في منطقة ما، وهي تتبع عادة ما قبل الكامبري أو الباليوزوي.	
B	نطاق - ب	Basin	حوض (تكتونية)
B- horizon	نطاق - ب	تركيب (طبقة مقعرة) دائري مقعر ضخم، قليل فيه الطبقات نحو مركزه.	
أحد نطاقات التربة يقع عموما تحت نطاق أ (A horizon)، ويكون عادة ذا لون بني أو محمر، وتزيد فيه عادة نسبة الطفل وأكاسيد الحديد.			
Backarc basin	حوض خلف قوس		
حوض ترسيب له شكل القوس تكون بسبب ترقق القشرة الأرضية خلف قوس صهاري.			

Aquiclude	حاجس الماء (صخر مانع)	Artesian well	بئر ارتوازية
جسم صخري غير منفذ أو أقل نفاذية يجاور مكنم ماء جوفي			بئر يرتفع فيه الماء فوق الخزان .
aquifer	ويعمل كاتبع لانسياب الماء الجوفي ، ويسمى أيضا طبقة حاصرة أو حابسة <i>confining layer</i> .	Aseismic ridge	حيد لازلزالي
Aquifer	مكنم ماء جوفي		حيد تحت البحر ذو أصل بركاني ، بعيد عن حواف الألواح الحالية ولذا يتميز بغياب النشاط الزلزالي (تقارن بحيود وسط المحيط والتي تكون نشطة زلزاليا).
جسم صخري أو حطام صخري (أديم) منفذ مشبع بالماء ، ويتحرك الماء الجوفي خلاله.		Ash	رماد
Arch	تحدب		نفرا تكون قطر الحبيبات فيها أقل من 2 مم ، وتسمى أحيانا الرماد البركاني <i>volcanic ash</i> .
تركيب رسيخي ممتد على نطاق واسع ، له شكل محدب واسع ، كان الترسيب فيه أقل بنيا تأثر بملاقات عدم توافق أكثر من الأحواض المحيطة .		Ash flow	فيض الرماد
Archean	دهر الأركي		خليط من الفئات النارية دقيقة الحبيبات والغازات مرتفعة الحرارة يتدفق من فوهة بركانية .
دهر يتبع زمان الحياة المستترة ، وهو الدهر الذي يلي دهر الهاديان .		Ash tuff	طف الرماد
Arête	حيد الثلجة		فئات ناري يكون فيه قطر حبيبات النفرا أقل من 2 مم.
مرتفع مستطيل له قمة مشرشرة حادة تتكون عندما تزداد دارات <i>cirques</i> الجليد المتجاورة في الحجم وتقارب وتتقابل تدريجيا عند قمة الجبل .		Asphalt	أسفلت ، زفت ، قطران
Argillite	أرجيليت		انظر "الغار <i>tar</i> " .
صخر منخفض رتبة التحول يتكون من صخر الطفل الرسوبي ، ويتميز بتكسر غير منتظم وغياب للثورق .		Assimilation	تمثل
Arkose (arkosic sandstone)	أركوز		ابتلاع الصهارة لأجسام صلبة أو سائلة غريبة وهضمها ، مثل أجزاء من الصخر المضيف . وتعرف الصهارة أو الصخر الناتج عنها بعد التمثيل بالصهارة أو الصخر المجهين .
حجر رملي غني في الفلسبار (أكثر من 25٪ فلسبار).		Asteroids	كويكبات
Artesian aquifer	مكنم ماء ارتوازي		أجسام صخرية غير منتظمة الشكل لها مدارات تقع بين مدارات المريخ والمشتري .
مكنم (خزان) ماء جوفي يكون الماء فيه تحت الضغط الهيدروليكي .		Asthenosphere	الغلاف اللدن (الأسثينوسفير)
Artesian flow	انسياب ارتوازي		منطقة من الوشاح تقع تحت القشرة ، على عمق 100 إلى 350 كم تحت السطح ، وتتميز بأن الصخور فيها تكون لدنة ولها درجة قليلة من الشدة ويسهل تشويبهها ، وتكون سرعة الموجات الزلزالية فيها منخفضة ، بينما تكون إعاقة <i>attenuation</i> الموجات الزلزالية عالية ، وتحدث الحركة فيها بالنشوء اللدن .
الانسياب في مكنم ماء جوفي محصور ، ويكون الماء الجوفي فيه واقعا تحت ضغط أكبر من الضغط في الخزان غير المحصور على عمق مشابه ، مما يؤدي إلى أن الماء في البئر الذي يحفر في الخزان المحصور يرتفع إلى أعلى .		Asymmetric fold	طية غير متماثلة
Artesian spring	عين ارتوازية		نوع من الطيات يكون فيه ميل أحد طرفيها (ذراعها) أو جناحيها) أكبر من الآخر .
عين ماء طبيعية تستمد ماءها من خزان ارتوازي .		Atmosphere	الغلاف الجوي
			خليط من الغازات ، تتكون أساسا من التروجين والأكسجين والكربون وثنائي أكسيد الكربون وبخار الماء وتحيط بالأرض .

Alteration	تغير	Angle of repose	زاوية الاستقرار
تعديل في التركيب المعدني للصخر بسببه عمليات فيزيائية أو كيميائية ، خاصة تأثير المحاليل الحرامية. كما يعنى أيضا تعديلاً في التركيب الكيميائي أو المعدني للصخر استجابة لعمليات التجوية .			أكبر زاوية انحدار ، مقاسة من الأفقى يمكن أن يستقر عندها حطام صخري دون أن ينحدر لأسفل أو يتساقط .
Amino acids dating	تحديد العمر بالأحماض الأمينية	Angular unconformity	عدم توافق زاوى
تحديد العمر اعتماداً على تحليل نسبة الحمض الأميني -D إلى الحمض الأميني -L في عظام حفريات ومواد أصداف العصر الرابع Quaternary.			أحد أنواع عدم التوافق ، وهو سطح تعرية تكون أسطح الطباقية فوقه وتحتة غير متوازية ، أى أن زاوية الميل تكون مختلفة في الصخور الأحدث أعلى سطح عدم التوافق عن الصخور الأقدم أسفل سطح عدم التوافق .
Amorphous	غير متبلور	Anhydrous	لامائى
مصطلح يطلق على الجوامد التى تفتقد إلى ترتيب ذرى داخل .			مصطلح يطلق على المادة الخالية من الماء ، وعكسها مائى .
Amphibolite	أمفيبوليت	Anion	أنيون
صخر متحول في درجة تحول متوسطة ، خشن التحبب عموماً ، يحتوى على نسبة كبيرة من الأمفيبول وفلسبار البلاجيوكليس .			أيون يحمل شحنة كهربية سالبة .
Amygdale	لوزة	Anorthosite	أنورثوسيت
حويصلة أو تجويف ممتلئة بمعادن ثانوية مثل الكاسيت والكوارتز ترسبت بفعل المياه الأرضية (الجوفية) .			صخر نارى خشن التحبب يتكون أساساً من البلاجيوكليس .
Andean-type plate margin	حد لوح طراز الأنديزى	Antecedent stream	مجرى مناضل أو سالف
حد يشبه ذلك الذى يوجد في غرب أمريكا الجنوبية له قشرة محيطية مبهطت تحت قشرة قارية لينتج قوس بركانى قارى (مثل براكين جبال الأنديز) على حافة قارة .			مجرى مائى حافظ على مساره عبر منطقة من القشرة الأرضية تعرضت للرفع نتيجة للطنى أو التصدع . أو هو مجرى مائى وجد قبل أن تنشأ التضاريس الحالية ، ولكنه حافظ على مساره الأصل على الرغم من التغير في تراكيب وتضاريس الصخور التى تسفله .
Andesite	أنديزيت	Anthracite	أنثراسيت
صخر نارى بركانى دقيق التحبب ، له تركيب متوسط بين الرويليت والبازلت ، يميز الأقواس البركانية فوق نطاقات الانتماس ، وهو المقابل البركانى للديوريت .			صخر متحول عن الفحم بالحرارة والضغط .
Andesite line	خط الأنديزيت	Anticline	تحدب (طية محدبة)
خط تقريبي موجود على الخرائط ، يحيط بحوض المحيط الأطلنطى ، ولا يوجد أى أنديزيت داخله .			تحدب الطبقات وطها لأعلى على هيئة قوس ، قارن بالطية المقعرة syncline .
Andesite magma	صهارة أنديزيتية	Appalachian orogeny	تجبل الأبالاش
أحد ثلاثة أنواع معروفة من الصهارة ، وتتميز بأن نسبة ثنائى أكسيد السيليكون SiO_2 بها تكون حوالى 60٪ من وزنها .			آخر الحركات الأرضية المهمة البانية للجبال ، والتى أثرت على شرق أمريكا الشمالية في العصر البرمى وربما حتى العصر الترياسى المبكر . وقد نتج عنها معظم الطيات وصدوع التدمير التى لازالت مؤثرة في جبال الأبالاش ، إلا أن التضاريس الموجودة حالياً نتجت من الرنغ الذى حدث في حقبة الحياة الحديثة وأدى إلى تجدد الأنهار لتحتفر أوديتها الحالية .
Angle of dip	زاوية الميل	Apparent polar wandering	مسار التجوال القطبى الظاهرى
أكبر زاوية بين سطح الطبقة أو أى سطح تركيبى آخر عن الأفقى ، وتقاس في مستوى عمودى على خط المضرب .			الحركات الظاهرية للأقطاب المغناطيسية ، والتى يتم تحديدها من قياسات أوضاع القطب باستخدام المغناطيسية القديمة .

معجم المصطلحات

يشمل هذا المعجم جميع المصطلحات المهمة التي وردت في كل فصل من الكتاب بالإضافة إلى بعض المصطلحات الأخرى التي قد يحتاجها الطالب

Aa	A	آه	Actualism	مبدأ الواقعية
		لاية لها مظهر غير منتظم ، تكسرت إلى كتل كبيرة لها نشوءات حادة ، ولها تكوين بازلي عادة.		افتراض ينص على أن القوانين العلمية الحالية يمكن أن تطبق في كل الأزمنة ، وبالتالي فإن كل العمليات التي تعمل حاليا على الأرض يفترض أنها كانت تعمل دائما بالطريقة نفسها ، ولكن بمعدلات مختلفة .
A-horizon		نطاق ١	Age	عمر
		أحد مستويات التربة ، والذي يأتي تحت المستوى (O) أو يكون هو أعلى مستويات التربة جميعا . ويكون عموما ذا لون غامق ، ويتميز بوفرة المواد العضوية.		قسم من الزمن الجيولوجي يكون أصغر من الحين . epoch
Ablation		نقذ	Agglomerate	أجلومرات
		كمية الجليد أو الثلج التي تفقد سنويا من الثلجة بعمليات الانصهار والتسامي وتجوية الرياح وتكسر جليد الثلجة .		صخر فتاتي ناري يتكون من تفرأ tephra في حجم القنبلة ، ويكون متوسط حجم حبيبات التفرأ أكبر من 64 مم .
Abrasion		بري (سحج ، صنفرة)	Aggradation	نمو بالترسيب
		تآكل الصخر ميكانيكيا نتيجة لاحتكاكه واصطدامه بصخر آخر أو بحييات راسب تحمله الرياح أو المياه الجارية أو الجليد .		بناء بالترسيب ، مثل ما يحدث في المجرى المائي .
Absolute age		عمر مطلق	Alluvial fan	مروحة طيعية
		عمر حدث أو ظاهرة مقدرا بالسنين ، ويقدر عادة بوسائل تحديد العمر بالمواد المشعة (radiometric dating) .		راسب غروطي الشكل ، يتكون من مواد فتاتية ، ينشأ عندما يتسع المجرى المائي فجأة ، عند انتقال المجرى من فوق جبل إلى واد مفتوح .
Abyssal plain		سهل عميق	Alluvium	طمي
		منطقة مسطحة كبيرة من قاع البحر العميق ، مغطاة بالرواسب ، ويبلغ اتحدار القاع فيها 1م/ كم ، ويتراوح العمق فيها بين 3-6 كم تحت مستوى سطح البحر .		راسب ترسب بالمجاري المائية في بيئات غير بحرية.
Accretion		تناهى ، رتق	Alpha particle	جسيم ألفا
		عملية تؤدي إلى تجمع الأجسام الصلبة لتكوين كوكبا أو قارة جديدة .		جسيم نووي ينبعث من نواة الذرة أثناء بعض التحولات الاشعاعية ، وهو يكافئ نواة ذرة الهيليوم He^4 .
Accumulation		تراكم	Alpine-Himalayan orogeny	تجبل الألب-الهمالايا
		كمية الثلج التي تضاف إلى كتلة الثلجة .		حركة رتبسية بانية للجبال ، تمتد من إسبانيا عبر جبال الألب في جنوب شرق أوروبا فجنوب غرب آسيا فسلالة جبال الهمالايا حتى اندونيسيا ، حدثت أثناء الأوليجوسين والميوسين ، ونشأت نتيجة لعدد من الاصطدامات بين قارة وقارة .
Active margin		حافة نشطة		
		حافة قارية تتميز بنشاط زلزالي وناري ، قد يصاحبها ارتفاع جبال ، ويرجع ذلك إلى حركة تقارب الألواح أو نتيجة لصدمع ناقل .		

مكتبة الاداء العربية للكتاب



Design M.T.

Bibliotheca Alexandrina



0666325



6222006315092